

Eine risikoadaptive Eingriffsstrategie für Gefahrenbremssysteme

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und
Verfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von
Philipp Reinisch
aus
München

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm
Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Tag der mündlichen Prüfung: 06. November 2012

Zusammenfassung

Auf dem Gebiet der Gefahrenbremssysteme sind in den letzten Jahren weitreichende Entwicklungsaktivitäten zu verzeichnen. Eine immer stärker und früher eingreifende Bremsung soll die Wirksamkeit der Systeme maßgeblich erhöhen und ihren individuellen und volkswirtschaftlichen Nutzen weiter steigern. Mit den veränderten Bremsparametern geht jedoch eine Reihe von Risiken einher, deren Reduktion das Ziel der vorliegenden Arbeit ist: das Falschwarn-, Falschauslöse- sowie das Folgekollisionsrisiko.

Um diese Risiken zu senken, werden sowohl das Fahrerverhalten als auch die zugrunde liegende Verkehrssituation modelliert, beobachtet und analysiert. Auf Basis der erarbeiteten menschlichen und physikalischen Kenngrößen werden dann die Komponenten Vorwarnung sowie Stärke und Zeitpunkt der Bremsung angepasst und in eine gesamthafte, risikoadaptive Eingriffsstrategie integriert.

Die Vorwarnung wird in Form von Rückschaltvorgängen umgesetzt, die von abgelenkten Fahrern als haptische Warnung, von überholenden Fahrern hingegen als Unterstützung wahrgenommen werden. Das Falschwarnrisiko lässt sich durch die damit gestiegene Verzeihlichkeit im Falle einer Falschwarnung erheblich reduzieren.

Der Eingriffszeitpunkt der eigentlichen Bremsung ergibt sich aus der Prämisse, bis zum Ende einer maximal angenommenen Reaktionszeit abzuwarten, ob der Fahrer selbständig die Situation entschärft; Falschauslösungen werden damit vermieden.

Für die Reduktion des Folgekollisionsrisikos wird der Bremsverlauf derart angepasst, dass zunächst stark und anschließend mit verminderter Bremskraft verzögert wird. Dieses degressive Profil verbessert die Reaktion des Folgeverkehrs und kann somit Folgekollisionen verhindern.

In weitreichenden Untersuchungen wird die Wirksamkeit der vorgestellten Ansätze nachgewiesen: Falschwarn- und -auslöserisiko können um mehr als die Hälfte, das Folgekollisionsrisiko um ein Drittel gesenkt werden.

Abstract

In the course of the past years, there have been extensive developments in the field of emergency braking systems. A system that brakes earlier and harder can result in higher effectiveness and individual plus economic benefit. However, a set of risks accompanies the modified braking parameters: the risk of false warnings and false brake actuations as well as the risk of rear-end collisions.

The objective of this thesis is to reduce these risks. For that purpose, both the driver behavior and the current and predicted driving situation are modeled, monitored and analyzed. On the basis of these parameters the brake pre-warning as well as the timing and strength of the brake actuation are adapted and included in a risk-adaptive strategy.

Downshifts in the automatic gearbox are used as new method of pre-warning. The resulting jerk attracts the attention of distracted drivers while at the same time providing overtaking drivers with higher engine torques. The risk of false warnings can therefore be reduced.

The actual brake timing results from the assumption that the driver normally reacts within his estimated reaction time. Up to the reaction time's end, an emergency braking maneuver is therefore not initiated and false brake actuations can be avoided.

For reducing the risk of rear-end collisions, the braking curve is adapted to start with a high deceleration and fade into light braking. This declining profile improves the reaction of the succeeding driver and therefore has the ability to avoid rear-end collisions.

Extensive studies prove the efficiency of the presented approaches: The risk of false warnings and false brake actuations can be reduced by more than half and the risk of rear-end collisions by a third.

Danksagung

Diese Arbeit wäre nicht gelungen ohne die unermüdliche Hilfe zahlreicher Personen, bei denen ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte.

An erster Stelle danke ich Prof. Dr. Dieter Schramm, Leiter des Lehrstuhls für Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen, für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung. Trotz seiner vielen Pflichten fand er stets die Zeit für Diskussionen, Ratschläge und wertvolle Anregungen zu dieser Arbeit. Prof. Dr. Klaus Bengler, Leiter des Lehrstuhls für Ergonomie an der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie seine Unterstützung bei allen psychologischen Aspekten.

Seitens der BMW Group Forschung und Technik danke ich an erster Stelle Dr. Peter Zahn für die fachliche Hilfe und die Freiheit, eigene Ideen zu verfolgen und zu verwirklichen. Ich danke weiterhin Dr. Klaus Gresser sowie Dr. Dirk Wisselmann für ihr Vertrauen und ihre Unterstützung. Meinen Kollegen danke ich sehr herzlich für die gemeinsame Arbeit und das freundschaftliche Verhältnis, das wesentlich zu einem guten und produktiven Arbeitsklima beitrug – allen voran Dr. Michael Ardelt, Dr. Frerk Fitzek, Florian Homm, Lutz Lorenz, Arne Purschwitz, Udo Rietschel, Dr. Daniel Schwarz und Dr. Moritz Werling. Des Weiteren danke ich Thorsten Facius, Martin Jantschik, Florian Kohlhuber, Dennis Kunz, Nils Pletschen und Stefanos Tsoukalas, die mit ihren Arbeiten einen wichtigen Beitrag zu der vorliegenden leisteten.

Ich danke allen Mitarbeitern sowie externen Doktoranden des Lehrstuhls für Mechatronik für viele spannende Gespräche an langen Abenden des Doktorandenseminars. Die gemeinsame Zeit werde ich in bester Erinnerung behalten.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Familie, meiner Frau Kerstin Reinisch sowie meinen Eltern Brigitte und Wilfried Reinisch, die mich vorbehaltlos unterstützen und ohne die ich das Geschaffte nicht erreicht hätte.

München, November 2012

Philipp Reinisch

Für Kerstin

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	xi
1 Einleitung	1
1.1 Potential von Gefahrenbremssystemen	2
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Problemstellung und Ziel der Arbeit	6
1.4 Aufbau der Arbeit	11
2 Systematisierung bestehender Gefahrenbremssysteme	13
2.1 Bewertung bestehender Seriensysteme	13
2.2 Bewertung bestehender Systeme im Forschungsstadium	20
2.3 Systematisierung und Ableitung eigener Ansätze	23
2.4 Zusammenfassung und Diskussion	26
3 Ableitung von Kenngrößen zur Situationsbewertung	29
3.1 Grundlagen	29
3.1.1 Verfügbare Datenbasis und Koordinatensystem	30
3.1.2 Verbleibende Zeit bis zur Kollision	30
3.1.3 Objektauswahl	32
3.2 Physikalische Rahmenbedingungen	34
3.2.1 Notwendige Abstände für Bremsen und Ausweichen	34
3.2.2 Folgeverkehrsbewertung	39
3.2.3 Spurwechselmöglichkeit	40
3.3 Menschliche Rahmenbedingungen	43
3.3.1 Reaktionsbedarf	43
3.3.2 Reaktionszeit	46
3.3.3 Reaktion	48
3.4 Zusammenfassung und Diskussion	50

4 Entwurf einer risikoadaptiven Eingriffsstrategie	51
4.1 Schaltruck als Fahrerwarnelement	51
4.2 Adaption von Eingriffszeitpunkt und -stärke	53
4.2.1 Berücksichtigung der Fahrerreaktion	53
4.2.2 Berücksichtigung des Folgeverkehrs	56
4.3 Aufbau des Gesamtsystems	58
4.4 Zusammenfassung und Diskussion	59
5 Technische Umsetzung	61
5.1 Beschreibung des Versuchsträgers	61
5.1.1 Ausrüstung	62
5.1.2 Alternative Sensorausrüstung	64
5.2 Realisierung des skalierbaren Schaltrucks	67
5.2.1 Getriebeseitiges Modul	68
5.2.2 Bremsenseitiges Modul	70
5.2.3 Validierung des Zusammenwirkens von Getriebe und Bremse	73
5.3 Aktorikansteuerung bei hochdynamischen Bremsmanövern	75
5.4 Zusammenfassung und Diskussion	76
6 Evaluation der Risikoreduktion	79
6.1 Simulative Evaluationswerkzeuge	79
6.2 Reduzierung des Falschwarnrisikos	81
6.2.1 Methodik des Expertentests	81
6.2.2 Ergebnisse	82
6.3 Reduzierung des Falschauslöserisikos	84
6.3.1 Methodik der quantitativen Analyse	86
6.3.2 Ergebnisse	87
6.4 Reduzierung des Folgekollisionsrisikos	90
6.4.1 Effekt der adaptierten Bremsstärke auf den Folgeverkehr	91
6.4.2 Auswirkungen auf das Folgekollisionsrisiko	100
6.5 Zusammenfassung und Diskussion	104
7 Zusammenfassung und Ausblick	107
A Glossar	111
B Fragebögen	115
B.1 Fragebogen zum Expertentest	116
B.2 Fragebogen zur Fahrsimulatorstudie	119
Literaturverzeichnis	125
Betreute studentische Arbeiten	135

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ACC	Adaptive Cruise Control
ALM	Allgemeines Lineares Modell
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
EHB	Elektrohydraulische Bremse
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
LIDAR	Light Detection and Ranging
OODA	Observe, Orient, Decide, Act
QM	Qualitätsmanagement
RADAR	Radio Detection and Ranging
TTC	Time to Collision

Formelzeichen

Notationen

Notation	Bedeutung
$ (\cdot) $	Betrag
$\overline{(\cdot)}$	Mittelwert
$\ (\cdot)\ $	Norm
(\cdot)	Skalar
$\vec{(\cdot)}$	Vektor
$(\cdot)'$	Wegableitung
$\dot{(\cdot)}$	Zeitableitung

Häufig verwendete Indizes

Index	Bedeutung
$(\cdot)_0$	Bezogen auf den Betrachtungszeitpunkt
$(\cdot)_{\text{ausw}}$	Bezogen auf ein Ausweichmanöver
$(\cdot)_{\text{brems}}$	Bezogen auf ein Bremsmanöver
$(\cdot)_{\text{deg}}$	Bezogen auf das degressive Bremsprofil
$(\cdot)_{\text{ego}}$	Bezogen auf das eigene Fahrzeug
$(\cdot)_{\text{ehb}}$	Bezogen auf die elektrohydraulische Bremse
$(\cdot)_{\text{folg}}$	Bezogen auf den Folgeverkehr
$(\cdot)_{\text{getr}}$	Bezogen auf das Automatikgetriebe
$(\cdot)_i$	Index
$(\cdot)_{\text{max}}$	Maximal zulässiger/ erreichbarer Wert
$(\cdot)_{\text{mess}}$	Bezogen auf aufgenommene Messdaten
$(\cdot)_{\text{min}}$	Minimal zulässiger/ erreichbarer Wert
$(\cdot)_{\text{obj}}$	Bezogen auf ein Fremdfahrzeug
$(\cdot)_{\text{regl}}$	Bezogen auf einen Regler
$(\cdot)_{\text{rel}}$	Relativer Wert zwischen Fremd- und Egofahrzeug
$(\cdot)_{\text{soll}}$	Soll-Wert
$(\cdot)_x$	In longitudinaler Richtung
$(\cdot)_y$	In lateraler Richtung

Verwendete Symbole

Symbol	Bedeutung
a	Beschleunigung
$a_{\text{rs}}(t)$	Verzögerungsverlauf während einer Getrieberückschaltung
b	Breite
b_{spur}	Spurbreite
d	Relativer Abstand
d^*	Euklidischer Abstand
$d_{y,\text{kor}}r$	Krümmungskorrigierter, lateraler Abstand
g	Erdbeschleunigung
g_{σ}	Sprungantwort
l	Länge
m	Masse
n	Anzahl
n_{mot}	Motordrehzahl
p	Eintritts-/ Irrtumswahrscheinlichkeit
p_{koll}	Kollisionsgefahr
p_{var}	Variationsparameter
r_{dyn}	dynamischer Reifenradius

r_{nom}	nomineller Reifenradius
r_{stat}	statischer Reifenradius
s	Weg
t	Zeit
$t_{\text{observe/ orient/ decide/ act}}$	Einzeldauern der Prozessschritte des OODA-Wirkkreises
t_{ooda}	Gesamtdauer des OODA-Wirkkreises
t_{reakt}	Fahrerreaktionszeit
t_{s}	Schwellzeit
t_{t}	Totzeit
t_{tc}	Verbleibende Zeit bis zur Kollision
t_{tc}^*	Verbleibende Zeit bis zur Kollision mit Vorwissen
t_{sw}	Spurwechseldauer
v	Geschwindigkeit

A	Parameter der Parabelbeschreibung
F	Testprüfgröße des allgemeinen linearen Modells
$G(s)$	Übertragungsfunktion einer Strecke
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
K	Anregungsamplitude
K_{int}	Integrationskonstante
M	Moment
$M_{\text{ehb, schwel}}$	Grenzwert des nichtlinearen Bremsenzusammenhangs
N	Stichprobe
$R(s)$	Übertragungsfunktion eines Reglers
$S(s)$	Übertragungsfunktion einer Steuerung
T	Zeitkonstante

β	Schwimmwinkel
$\gamma_{\alpha, r}(x)$	Dichtefunktion
κ	Bahnkrümmung
μ	Fahrbahnreibungswert
π	Kreiszahl
σ	Standardabweichung

$\Gamma(x)$	Euler'sche Gammafunktion
$\Theta(x)$	Heaviside-Funktion

KAPITEL 1

Einleitung

Der Charakter der Fahrzeugführung hat sich in den letzten Jahrzehnten erheblich gewandelt. Während früher die reine Fortbewegung im Vordergrund stand, wird heute die Fahrt in einem modernen Automobil so sicher und komfortabel wie möglich gestaltet. Dies steigert zwar die Qualität des Individualverkehrs, das gleichzeitig gestiegene Verkehrsaufkommen hat aber auch negative Konsequenzen. Vor allem die hohe Umweltbelastung durch Abgase sowie der immense volkswirtschaftliche Schaden durch Staus und Unfälle stehen dabei im Fokus der Kritik.

Die Anzahl der Unfälle sowie der dabei verletzten und getöteten Personen wird allgemein als Maß für die Verkehrssicherheit herangezogen (vgl. [32]). Deren Erhöhung ist ein wesentliches Ziel der Entwicklungsaktivitäten aller Fahrzeughersteller. Dazu stehen sowohl passive als auch aktive Sicherheitssysteme zur Verfügung. Während die passiven Sicherheitssysteme erst zum Zeitpunkt der Kollision ihre Wirkung zeigen und die Unfallschwere verringern, wirken aktive Systeme bereits im Vorfeld mit dem Ziel der möglichst vollständigen Unfallvermeidung (vgl. [66]). Angetrieben werden die Fortschritte der Automobilhersteller dabei von Entwicklungen in der Gesetzgebung (z.B. Gurtpflicht) sowie durch den Ausbau von Infrastruktur, aber auch durch ein gewachsenes gesellschaftliches Bewusstsein für Verkehrssicherheit.

Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung der Unfallzahlen in Deutschland seit den 1950er Jahren. Der Einfluss der passiven Sicherheitssysteme wie beispielsweise verbesserte Fahrzeugstrukturen und Rückhaltesysteme sowie die genannten gesellschaftspolitischen Einflüsse spiegeln sich in der Anzahl der verletzten und getöteten Personen wider. Die Anzahl ersterer konnte über die Jahre trotz gestiegenen Verkehrsaufkommens nahezu konstant gehalten, die Anzahl der Getöteten seit dem Jahr 1970 sogar kontinuierlich gesenkt werden – abgesehen von einem Anstieg nach der Wiedervereinigung bedingt durch die größere zugrundeliegende Bevölkerungszahl und die damit höhere Kilometerfahrleistung. Im Jahr 2010 ist die Zahl der in Deutschland im Verkehr getöteten Personen nach Zahlen des Sta-

tistischen Bundesamts schließlich zum ersten Mal unter die Marke von 4000 gefallen¹ (vgl. [78]).

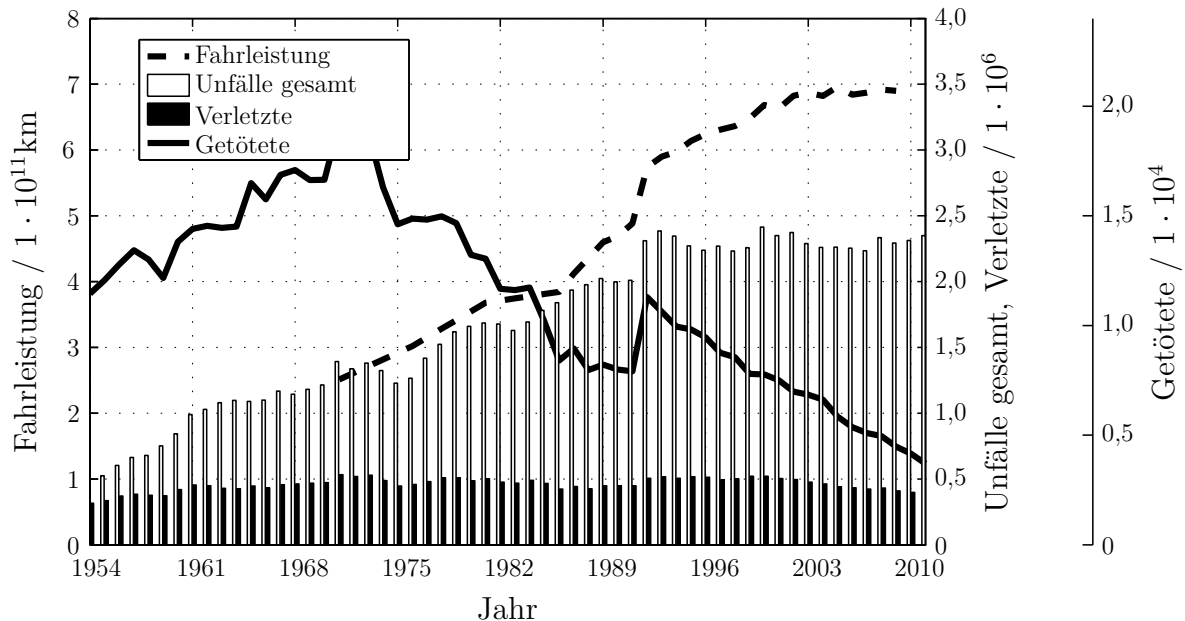


Abbildung 1.1: Entwicklung der Unfallzahlen in Deutschland (vgl. [15, 46, 78, 90])

Während das Potential der passiven Sicherheitssysteme weitgehend erschöpft ist, kann insbesondere der zunehmende Einsatz von Elektronik im Fahrzeug die Unfallzahlen weiter reduzieren (vgl. [28, 56]). Aktive Sicherheitssysteme wie beispielsweise das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) sind Teil dieser Entwicklung und tragen positiv zur Verkehrssicherheit bei (vgl. [32]). Auch die Unfallzahlen spiegeln diese Tendenz wider: Während bis zum Jahr 1990 noch ein direkter Zusammenhang zwischen der Kilometerfahrleistung, also der Summe der Fahrleistungen aller am Individualverkehr teilnehmenden Kraftfahrzeuge innerhalb eines Jahres, und der Anzahl der Verkehrsunfälle erkennbar ist, divergieren die Kurven im weiteren Verlauf. Obwohl die Fahrleistung weiter ansteigt, bleibt die Zahl der Verkehrsunfälle in etwa konstant.

1.1 Potential von Gefahrenbremssystemen

Im Bereich der aktiven Unfallvermeidung stehen vor allem die so genannten Fahrerassistenzsysteme im Vordergrund (vgl. [83]). Sie wirken den gestiegenen Anforderungen an den Fahrer im immer dichter werdenden Verkehr entgegen. Neben der Unterstützung der originären Fahraufgabe entlasten sie von monotonen Nebenaufgaben und kompensieren die bekannten potentiellen Defizite des Menschen wie Unaufmerksamkeit und die damit verbundenen hohen Reaktionszeiten (vgl. [32]).

¹Im Jahr 2011 ist ein Wiederanstieg der Getöteten um 9,4% auf 3991 zu verzeichnen, der v.a. auf die Witterungsbedingungen zurückgeführt wird (vgl. [80]).

Eine besondere Rolle innerhalb der Fahrerassistenz nehmen die aktiven Sicherheitssysteme für den Längsverkehr beziehungsweise Gefahrenbremssysteme ein. Der durch sie adressierte Unfalltyp führt zu den meisten Unfällen mit Personenschaden sowie zu der zweitgrößten Anzahl an getöteten Verkehrsteilnehmern (vgl. [95]). Ihr Potential zur Erhöhung der Verkehrssicherheit ist entsprechend groß. Selbst bei einer Begrenzung des Längsverkehrs auf eine unidirektionale Betrachtung, das heißt auf Fahrzeuge, die sich in dieselbe Richtung wie das Egofahrzeug bewegen, zeigen die Unfallarten (Stand 2010), dass eine Auffahrkollision mit 16% noch die zweitgrößte Kategorie der Unfälle mit Personenschaden darstellt (siehe Abbildung 1.2).

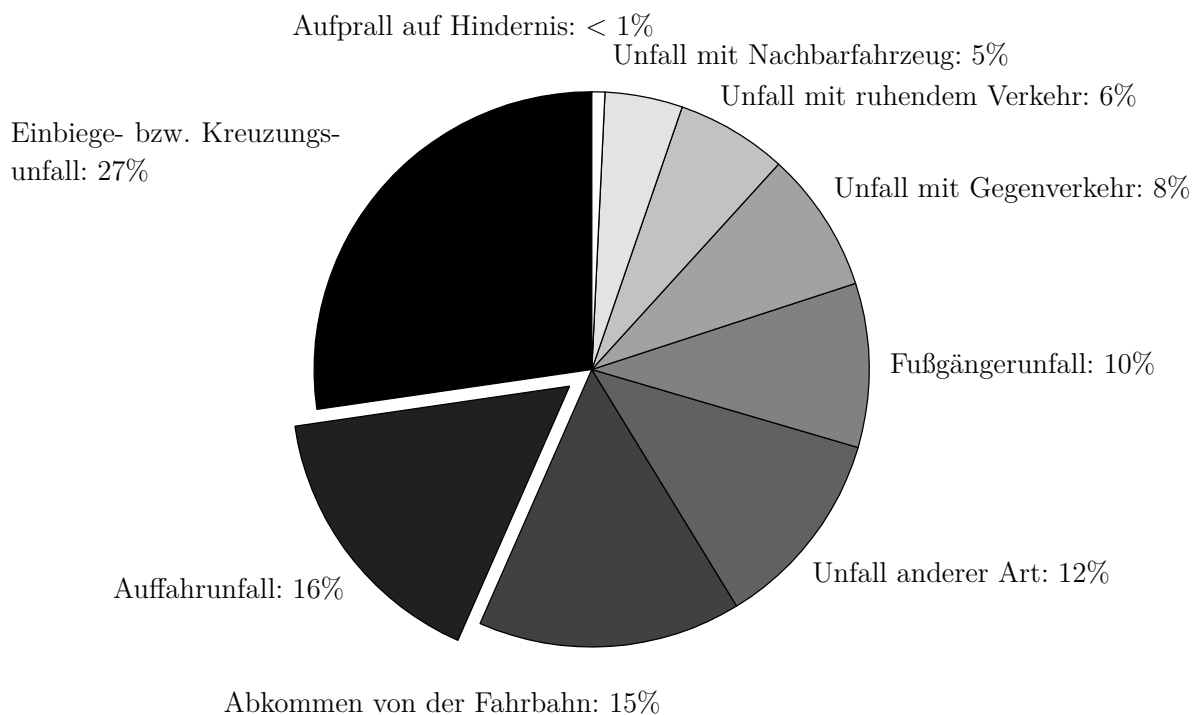


Abbildung 1.2: Unfälle mit Personenschaden nach Unfallarten in Deutschland (vgl. [79])

Hinzu kommt, dass in 68% aller Auffahrunfälle Unaufmerksamkeit die Unfallursache ist. Unter anderem führt dies dazu, dass nur in 1% der Fälle, in denen eine Notbremsung nahe der Kraftschlussgrenze erforderlich gewesen wäre, eine Vollbremsung erfolgt und in mehr als 50% nur sehr schwach oder gar nicht ($< 2 \text{ m/s}^2$) gebremst wird (vgl. [70]). Zu dichtes Auffahren kommt als zusätzlicher Auslöser in weiteren 11% der Fälle hinzu und ist in 9% die alleinige Kollisionsursache (vgl. [70]). Dementsprechend können Assistenzsysteme mit längsdynamischem Eingriff eine Vielzahl der möglichen Auffahrunfälle adressieren.

1.2 Stand der Technik

Aufbauend auf der Funktion eines Abstandsregeltempomaten (Adaptive Cruise Control – ACC) werden die Systemgrenzen für aktuelle Gefahrenbremssysteme schrittweise erweitert. Während ACC als Komfortfunktion bei geringerer Geschwindigkeit eines vorausfahrenden

Fahrzeugs im Vergleich zur eigenen Geschwindigkeit die Bremsen leicht betätigt und einen gewählten Zeitabstand einregelt, reicht der auf den Komfortbereich begrenzte Verzögerungsbereich des Systems ($\approx -4 \text{ m/s}^2$) in einer kritischen Situation zur eigenständigen Unfallvermeidung nicht aus. In diesem Fall erhält der Fahrer lediglich die Aufforderung, die Fahrzeugführung wieder vollständig zu übernehmen.

Als Erweiterung des Abstandsregeltempomaten in Richtung eines Systems zur Kollisionsvermeidung stehen verschieden stark intervenierende Ausprägungen zur Verfügung (vgl. [10, 91]):

- **Bremsassistenten** konditionieren die Bremsanlage für eine mögliche Notbremsung.

Erkennt das System auf Basis von Fahrumgebungsdaten, dass eine mögliche Auffahrkollision kurz bevorsteht, wird die Bremsanlage vom Fahrer unbemerkt vorbefüllt und die Bremsbeläge bereits an die Bremsscheiben angelegt. Sobald der Fahrer die Bremse betätigt, steht der angeforderte Bremsdruck somit schneller zur Verfügung. Die reduzierte Totzeit des Systems minimiert den Anhalteweg vor dem potentiellen Kollisionsgegner. Dieser Effekt wird bei nasser Fahrbahn durch das Trocken-Wischen der Bremsscheiben während der Vorbefüllung noch verstärkt.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, unabhängig vom durch den Fahrer tatsächlich aufgebauten Bremsdruck das Fahrzeug mit der Verzögerung abzubremesen, die für die Kollisionsvermeidung benötigt wird. Dazu wird aus der Schnelligkeit der Bremspedalbetätigung die Dringlichkeit der Bremsung abgeleitet. Bei hoher Dringlichkeit – auch Schlagbremsung genannt (siehe [38]) – und erkanntem Kollisionsobjekt wird die notwendige Verzögerung eingeregelt. Dies verhindert, dass der Fahrer trotz schneller Reaktion nicht ausreichend stark bremst.

- **Kollisionswarnsysteme** warnen den Fahrer vor einer möglichen Auffahrkollision.

Unter Berücksichtigung des hohen prozentualen Anteils unaufmerksamer Fahrer vor einer Auffahrkollision (siehe Abschnitt 1.1) kann eine Kollisionswarnung die oben beschriebenen Bremsassistenten sinnvoll erweitern. Zur Reduktion der Fahrerreaktionszeit wird die Warnung frühzeitig in der Entstehung der kritischen Situation ausgegeben. Dadurch steht dem Fahrer mehr Zeit zur Verfügung, die Situation selbständig durch Ausweichen oder Bremsen zu entschärfen. Die Durchführung des Kollisionsvermeidungsmanövers selbst bleibt beim Fahrer.

Derzeit sind unterschiedliche Ausprägungen von Kollisionswarnungen in Verwendung: Die meisten Ansätze gehen dabei nicht über Kombinationen aus optischen Anzeigen im Kombiinstrument und akustischen Warntönen hinaus. Alternativ oder ergänzend ist auch ein kinästhetischer, körperganzheitlicher Ansatz möglich – beispielsweise durch einen kurzzeitigen Bremsruck oder das Straffen des Fahrergurts (vgl. [68, 86]).

- **Kollisionsfolgenminderungssysteme** reduzieren die Aufprallgeschwindigkeit.

Unter der Voraussetzung, dass der Fahrer auf eine vorgelagerte Kollisionswarnung keine Reaktion zeigt, initiiert ein Kollisionsfolgenminderungssystem bei Erreichen der Unvermeidbarkeitsgrenze des Auffahrunfalls (ab hier ist Kollisionsvermeidung

weder durch Bremsen noch durch Ausweichen noch möglich) selbständig eine Teil- oder Vollbremsung. Primäres Ziel ist dabei, die Aufprallgeschwindigkeit auf den potentiellen Unfallgegner zu reduzieren und damit die Unfallschwere zu mindern.

Die autonome Beeinflussung der Längsdynamik verlangt eine hohe Güte und Sicherheit bei der Erkennung der Kollisionsobjekte sowie bei der Bewertung der Situationskritikalität. Die für das ACC hauptsächlich verwendeten Radarsensoren (Radio Detection and Ranging – RADAR) werden daher für diese Ausprägung eines Gefahrenbremsystems um weitere Sensorsysteme wie beispielsweise Mono- oder Stereokameras ergänzt. Erst die so geschaffene diversitäre Redundanz kann eine hohe Systemsicherheit gewährleisten.

Greift der Fahrer während der automatischen Notbremsung beispielsweise durch Betätigen der Pedalerie oder des Lenkrads oder durch Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers ein, wird die Fahrzeugführung wieder vollständig an den Fahrer übergeben und die Bremsung abgebrochen.

- **Kollisionsvermeidungssysteme** verhindern Auffahrkollisionen vollständig.

Größtmögliche Sicherheit bieten Kollisionsvermeidungssysteme. Sie initiieren eine Vollverzögerung bereits zu einem Zeitpunkt, zu dem dem Fahrer oft noch alternative Handlungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Dadurch wird eine vollständige Vermeidung des bevorstehenden Unfalls durch Bremsen erreicht. Die Systemanforderungen sind im Vergleich zu einem Kollisionsfolgenminderungssystem noch größer. Zur richtigen Beurteilung und Interpretation der aktuellen Verkehrssituation reicht die sensorielle Erfassung des Fahrzeugfrontbereichs nicht aus. Erst zusätzliche Sensoren an der Fahrzeugseite sowie am Fahrzeugheck schaffen die Grundlage für die benötigte Systemperformanz.

Wie groß der abgedeckte Differenzgeschwindigkeitsbereich ist, hängt von der Reichweite der gewählten Sensoren ab. Wird als einfache Näherung für den Bremsweg $s_{x,\text{brems}}$ mit der mittleren Verzögerung $\bar{a}_x = -9 \text{ m/s}^2$ und der beispielhaften Geschwindigkeit $v_x = 50 \text{ m/s} = 180 \text{ km/h}$ für die Bremsung auf ein stehendes Hindernis

$$s_{x,\text{brems}} = \frac{v_x^2}{|2 \cdot \bar{a}_x|} \quad (1.1)$$

verwendet (vgl. [56]), so müssen relevante Fremdfahrzeuge in einer Entfernung von circa 140 m sicher detektiert und klassifiziert werden, um Kollisionsvermeidung zu erreichen. Da die erkannte Situation jedoch zuerst analysiert und bewertet werden muss, ist real eine noch größere Detektionsreichweite notwendig.

Die genannten Ausprägungen beschreiben die evolutionäre Entwicklung der Systeme. Während Bremsassistenten bereits seit vielen Jahren eingesetzt werden, finden sich Kollisionsfolgenminderungssysteme erst im Jahr 2011 in den Modellreihen vieler Fahrzeughersteller (vgl. [91]). Dabei ersetzt die nächsthöhere Ausprägung nicht die vorangegangene Stufe, sondern bietet eine sinnvolle Ergänzung.

Der Schritt vom Kollisionsfolgenminderungssystem zur vollständigen Kollisionsvermeidung in allen Geschwindigkeitsbereichen wird von rechtlichen sowie betriebswirtschaftlichen Aspekten begleitet. Während die rechtliche Grundlage für einen frühen Bremsengriff noch diskutiert wird, sind vor allem die hohen Kosten für die benötigten Sensorkomponenten ein Grund dafür, dass Kollisionsvermeidungssysteme bisher vor allem im Forschungsbereich entwickelt werden².

1.3 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit ist ein Kollisionsvermeidungssystem im Forschungsstadium (siehe [66]). Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, ist dessen primäres Ziel die vollständige Vermeidung einer sich anbahnenden Kollision. Der Bremsengriff minimiert damit das Auffahrerisiko. Aus der vorverlagerten und verstärkten Bremsung resultieren jedoch eine Reihe weiterer, teils abhängiger Risiken, deren Reduzierung Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Dazu gehören

- das **Falschauslöserisiko**,
- das **Falschwarnrisiko** sowie
- das **Folgekollisionsrisiko**,

die im Folgenden erläutert werden. Vereinfachte Rechnungen sowie Grafiken machen den Handlungsbedarf deutlich. Risiko definiert sich dabei stets als Produkt aus Eintrittshäufigkeit und Schadensausmaß des Ereignisses (vgl. [30]). Weitere Definitionen, die im Rahmen der Arbeit Verwendung finden, sind in Anhang A zusammengefasst.

Falschauslöserisiko

Als Schaden bei einer oder mehreren Falschauslösungen wird ein Akzeptanzverlust beim Fahrer und damit die Abschaltung des Gefahrenbremssystems angenommen. Mit dieser verliert das System seine vollständige Wirksamkeit. Um dies zu verhindern, das Falschauslöserisiko also zu reduzieren, bleibt als Stellhebel die Reduktion der Eintrittshäufigkeit einer solchen Bremsung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit definiert sich das Falschauslöserisiko also als direkt proportional zur Eintrittshäufigkeit einer Falschauslösung pro gefahrene Kilometer unter Annahme eines konstanten Schadensausmaßes.

Doch warum können Bremsungen kurz vor einer Auffahrkollision als falsch empfunden werden? Um der potentiellen Kollision zu entgehen, stehen dem Fahrer im Regelfall zwei Handlungsalternativen zur Verfügung. Durch Bremsen kann das Fahrzeug vor dem potentiellen Kollisionsgegner zum Stehen beziehungsweise auf dieselbe Geschwindigkeit gebracht werden; durch Ausweichen kann die Kollision in lateraler Richtung „umfahren“ werden. Beide Optionen haben einen definierten Platzbedarf in Längsrichtung, der mit steigender Geschwindigkeit zunimmt.

²Für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis circa 30 km/h sind bereits Kollisionsvermeidungssysteme im Serieneinsatz.

Zur Bestimmung des notwendigen Platzbedarfs wird folgende Übersichtsrechnung durchgeführt (vgl. [66]): Für ein als Punktmasse betrachtetes Fahrzeug, das mit der Ausgangsgeschwindigkeit v_x fährt, gelten für den Bremsweg $s_{x,\text{brems}}$ Gleichung (1.1) sowie für den Ausweichweg $s_{x,\text{ausw}}$ bei einer mittleren Querbeschleunigung \bar{a}_y und einer zu überwindenden Breite in Querrichtung $b_{y,\text{ausw}}$ bezogen auf ein stehendes Hindernis

$$s_{x,\text{ausw}} = v_x \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot b_{y,\text{ausw}}}{\bar{a}_y}} . \quad (1.2)$$

Um von der Annahme eines stehenden Hindernisses auf ein sich fortbewegendes überzugehen, kann die Geschwindigkeit v_x als Differenzgeschwindigkeit $v_{x,\text{rel}} = v_{x,\text{obj}} - v_{x,\text{ego}}$ betrachtet werden. Der Weg s_x für Bremsen und Ausweichen wird dann durch den notwendigen Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug in Längsrichtung d_x ersetzt. Abbildung 1.3 stellt die damit berechneten Werte für $|\bar{a}_x| = |\bar{a}_y| = 9,81 \text{ m/s}^2$ (also als fahrphysikalische Maximalbetrachtung) sowie $b_{y,\text{ausw}} = 2 \text{ m}$ dar.

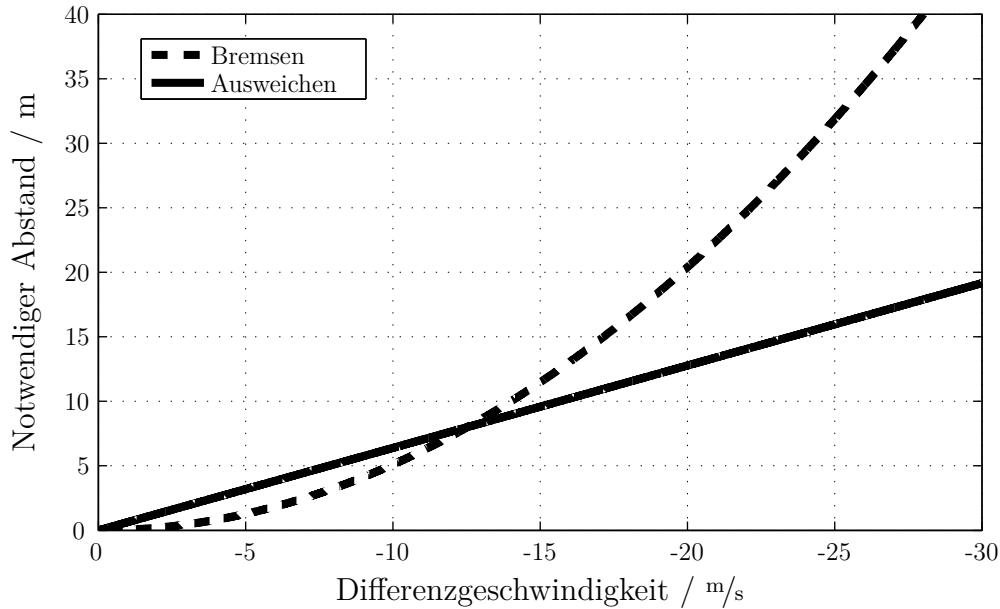


Abbildung 1.3: Notwendiger Abstand für kollisionsvermeidendes Bremsen und Ausweichen in Abhängigkeit der Differenzgeschwindigkeit (vgl. [45, 66])

Der quadratische Zusammenhang zwischen Bremsweg und Geschwindigkeit und der im Vergleich dazu nur lineare Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und dem Ausweichweg führen dazu, dass im niedrigen Differenzgeschwindigkeitsbereich ein Bremsmanöver weniger Abstand benötigt als ein Ausweichmanöver – im höheren Differenzgeschwindigkeitsbereich jedoch mehr. Durch Gleichsetzen der Gleichungen (1.1) und (1.2) sowie nach Einsetzen der oben genannten Werte ergibt sich für den Umkehrpunkt neben der trivialen Lösung $v_{x,\text{rel}} = 0 \text{ m/s}$

$$v_{x,\text{rel}} = 2 \cdot \bar{a}_x \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot b_{y,\text{ausw}}}{\bar{a}_y}} \approx 12,5 \text{ m/s} = 45 \text{ km/h} . \quad (1.3)$$

Ein Kollisionsvermeidungssystem, das unabhängig von den vorliegenden Geschwindigkeiten versucht, durch Bremsen die drohende Kollision zu verhindern, sieht sich dadurch im höheren Differenzgeschwindigkeitsbereich einem Zielkonflikt ausgesetzt. Greift der Assistent bei Erreichen des notwendigen Bremsabstands mit einer Vollverzögerung ein, wird die Kollision vermieden – ein Fahrer, der beispielsweise ein knappes Überholmanöver plant, wird durch den Eingriff jedoch überrascht. Dieser Effekt wird auch als Eingriffsdilemma bezeichnet (vgl. [67]) und ist gerade auf Autobahnen mit großen Geschwindigkeitsunterschieden, beispielsweise zwischen Last- und Personenkraftwagen, häufig anzutreffen.

Während aus physikalischer Sicht die initiierte Bremsung nachvollziehbar und im Sinne der Unfallvermeidung durch Bremsen auch richtig ist, ist sie aus subjektiver Sicht des Fahrers falsch und nicht vertretbar. Im Extremfall resultiert aus der ursprünglich unfallvermeidenden Maßnahme aufgrund der überraschenden Bremsung eine für den Fahrer kritische Situation.

Zu beachten ist, dass zwischen dem Falschauslöserisiko und dem Auffahrrisiko ein direkter Zusammenhang besteht. Bremst das Gefahrenbremssystem immer bei Erreichen des notwendigen Bremsabstands, ist die Gefahr von subjektiven Falschauslösungen am höchsten. Wird vollständig auf eine kollisionsvermeidende Bremsung verzichtet – was wiederum einem Kollisionsfolgenminderungssystem entspricht – wird die Anzahl an Falschauslösungen zwar minimiert, in vielen Situationen kann die Kollision dann jedoch nicht mehr vermieden werden.

Falschwarnrisiko

Der Effekt des oben beschriebenen Eingriffsdilemmas wird verstärkt, falls vor dem autonomen Bremseingriff des Systems noch eine Kollisionswarnung ausgesprochen werden soll. Diese muss aufgrund der dem Fahrer zugestandenen Reaktionszeit früher erfolgen und liegt damit zeitlich noch weiter im unscharfen Bereich, in dem die Fahrerintention – Bremsen oder Überholen – schwer bestimmbar ist. Das zugehörige Warndilemma besagt, dass eine Warnung umso wirksamer ist, je früher sie erfolgt (vgl. [59]). Gleichzeitig nimmt die Zahl an Falschwarnungen damit jedoch zu (vgl. [13]).

Abbildung 1.4 stellt die Problematik im Vergleich zu einem Kollisionsfolgenminderungssystem bei hohen Differenzgeschwindigkeiten grafisch dar. Während sich der bisherige Warnbereich der Kollisionsfolgenminderung um den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt bewegt, muss die Warnung für ein Kollisionsvermeidungssystem früher erfolgen. Dort ist auch nach der Warnung noch ein kollisionsvermeidendes Bremsen möglich, gleichzeitig ist die Kenntnis über den Fahrerwunsch aber vielfach unschärfer. Die Wahrscheinlichkeit, wie beim Falschauslöserisiko einen unvorbereiteten, sich im Beginn eines Überholmanövers befindlichen Fahrer zu alarmieren, ist hoch. Zwar ist die Auslösung einer Warnung weit weniger kritisch als eine unvorbereitete Bremsung, sie mindert jedoch ebenso sehr die Akzeptanz des Systems.

Im Unterschied zum Falschauslöserisiko wird beim Falschwarnrisiko aufgrund der schwierigen Situationsbeurteilung in der frühen Phase im Rahmen der vorliegenden Arbeit von einer konstanten Eintrittshäufigkeit ausgegangen. Der Stellhebel in diesem Fall ist also der Schaden einer ungerechtfertigt initiierten Warnung. Dieser lässt sich über die Verzeih-

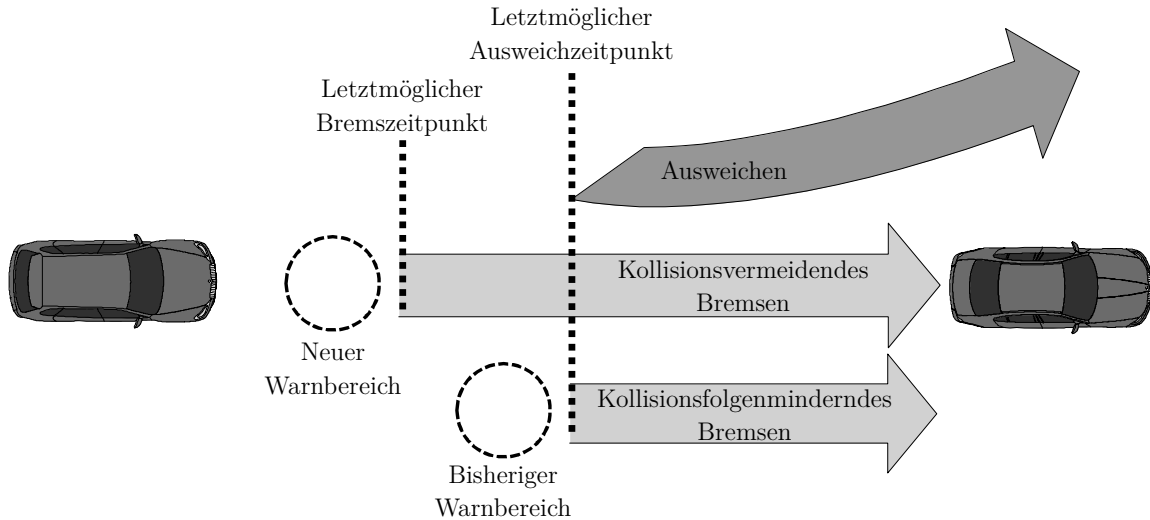


Abbildung 1.4: Vorverlegung des Warnzeitpunkts im Vergleich zu einem Kollisionsfolgenminderungssystem

lichkeit einer Falschwarnung beurteilen, die deren Grad der Entschuldbarkeit beschreibt. Zwischen ihr und dem Zeitpunkt der Warnung existiert folgender Zusammenhang: Je verzeihlicher die Warnung ist, desto früher kann sie ausgegeben werden, weil eine Falschwarnung den Fahrer weniger stört (vgl. [40]). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit definiert sich das Falschwarnrisiko also als direkt proportional zur Verzeihlichkeit einer Falschwarnung, die deren Schaden beschreibt, unter Annahme einer konstanten Eintrittshäufigkeit.

Folgekollisionsrisiko

Während die vorangegangenen Risiken räumlich vor dem eigenen Fahrzeug liegen, bestehen Wechselwirkungen auch mit dem folgenden Verkehr. Greift das Gefahrenbremsssystem für einen nachfolgenden Fahrer überraschend ein, so wird ihm eine schnelle und starke Reaktion abverlangt, um die Kollision seinerseits zu verhindern. Im äußersten Fall vermeidet die Gefahrenbremsung den Unfall nach vorne, verlagert die Kollision jedoch ans eigene Fahrzeugheck.

Im Gegensatz zu den bereits erläuterten Risiken ist im Falle des Folgekollisionsrisikos sowohl die Eintrittshäufigkeit als auch das Schadensausmaß einer Folgekollision beeinflussbar. Letzteres skaliert dabei mit der verbleibenden relativen Aufprallgeschwindigkeit, die wiederum (bei Annahme gleicher Massen) direkt proportional zum Aufprallimpuls ist. Entsprechend ergibt sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Definition des Folgekollisionsrisikos als Produkt aus Häufigkeit einer Folgekollision in den untersuchten Szenarien und der mittleren Rest-Relativgeschwindigkeit im Kollisionsfall.

Auch hier kann eine vereinfachte Rechnung den Handlungsbedarf verdeutlichen. Gegeben sei ein Autobahnszenario mit zwei Fahrzeugen mit der Geschwindigkeit $v_{x,ego} = v_{x,obj} = 140 \text{ km/h}$. Das Fremdfahrzeug folgt dem eigenen Fahrzeug mit einer definierten Zeitlücke t_{rel} . Diese entspricht der Zeitdauer, nach der das folgende Fahrzeug an dem Punkt ist, an dem sich das eigene Fahrzeug zum Betrachtungszeitpunkt befindet. Aufgrund von Unaufmerksamkeit wird im eigenen Fahrzeug eine Gefahrenbremsung auf einen

mit 70 km/h vorausfahrenden Lastkraftwagen ausgelöst. Zum Abbau der Differenzgeschwindigkeit $v_{x,\text{rel}} = -70 \text{ km/h}$ bremst das System mit der mittleren Verzögerung $\bar{a}_{x,\text{ego}} = -9 \text{ m/s}^2$.

Unter Annahme abschnittsweise zeitlich stationärer Beschleunigungen bei beiden Fahrzeugen lässt sich über je zwei Bewegungsgleichungen – für das Egofahrzeug während und nach der Bremsung sowie für das Fremdfahrzeug während der Reaktionszeit und während der Bremsung – die maximale Reaktionszeit ermitteln, die zur Kollisionsvermeidung durch den Folgefahrzeugfahrer noch ausreicht. Die ausführliche Herleitung dazu findet sich in Abschnitt 3.2.2.

Abbildung 1.5 zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit der freien Parameter mittlere Verzögerung des Folgefahrzeugs nach der Reaktionszeit $\bar{a}_{x,\text{obj}}$ sowie Zeitlücke t_{rel} . Letztere wird in einem Bereich von $0,7 \text{ s}$ bis $1,1 \text{ s}$ variiert. Dies entspricht den am häufigsten beobachteten Zeitlücken im Folgeverkehr (vgl. [25]). Zu beachten ist, dass unterhalb einer Zeitlücke von $0,9 \text{ s}$ bereits der Bußgeldbereich beginnt (nach Straßenverkehrs-Ordnung, Stand 12/ 2010). Für die mittlere Verzögerung des Folgefahrzeugs $\bar{a}_{x,\text{obj}}$ wird von einer mittleren bis starken Bremsung ausgegangen.

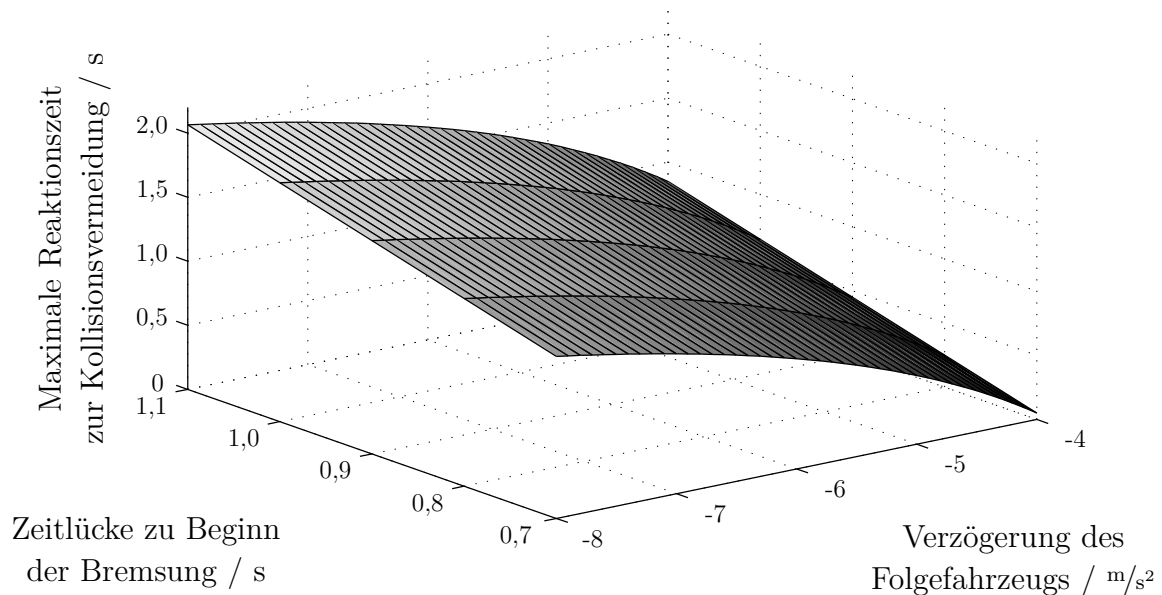


Abbildung 1.5: Maximale Reaktionszeit zur Kollisionsvermeidung in Abhängigkeit von Zeitlücke und Verzögerung

Es zeigt sich, dass die Reaktionszeiten in der angenommenen Situation vor allem bei zu geringem Abstand und zu schwacher Bremsung maximal circa $1,0 \text{ s}$ betragen dürfen, um Kollisionsvermeidung zu erreichen. Dies entspricht der vereinfacht angenommenen „Schrecksekunde“ (siehe [11]) – also $t_{\text{reakt,obj}} = 1,0 \text{ s}$; höhere Werte führen im dargestellten Szenario wie auch in anderen Geschwindigkeitsbereichen zu einem erheblichen Risiko für den Folgeverkehr.

Ziel der Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die identifizierten Risiken durch den Entwurf einer risikoadaptiven Eingriffsstrategie reduziert werden. Dazu steht die Anpassung der

Stellgrößen Vorwarnung sowie Zeitpunkt und Stärke der Bremsung zur Verfügung (vgl. Abbildung 1.6). Weiterhin soll die entwickelte Strategie implementiert und im Realfahrzeug evaluiert werden. Die Risikoreduktion stützt sich dabei auf eine eingehende Situationsbewertung sowie maßgeblich auf die Berücksichtigung des Verhaltens des Fahrers und anderer Verkehrsteilnehmer.

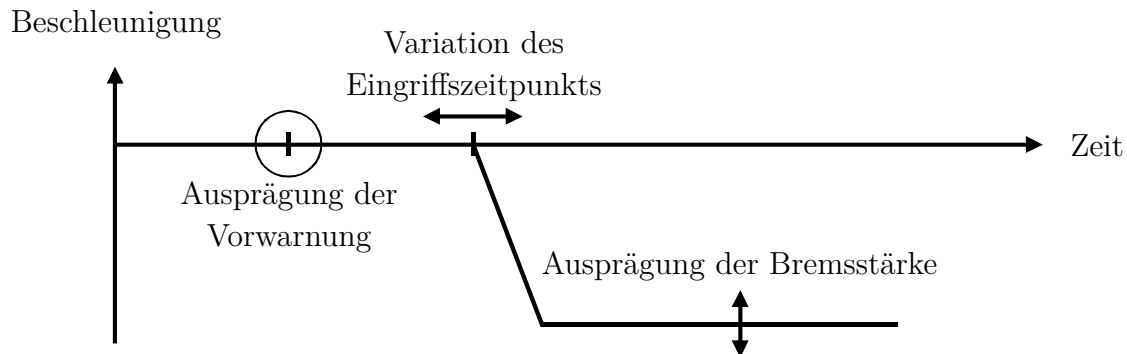


Abbildung 1.6: Schematischer Aufbau des Gesamtkonzepts

Bezogen auf die einzelnen Risiken lassen sich folgende Einzelziele zusammenfassen: Der Zeitpunkt der Bremsung soll derart adaptiert werden, dass die Eintrittshäufigkeit einer Falschauslösung bei hohen Differenzgeschwindigkeiten im Vergleich zu einem reinen Kollisionsvermeidungssystem reduziert wird. Die Auswirkungen auf die Wirksamkeit der Bremsung sind dabei möglichst gering zu halten. Das heißt, die reduzierte Falschauslöserate darf nicht durch den vollständigen Verzicht auf Kollisionsvermeidung erreicht werden.

Die Vorwarnung soll derart gestaltet werden, dass sich ihre Verzeihlichkeit im Falle einer Falschwarnung im Vergleich zu bestehenden Vorwarnkonzepten erhöht und sich deren Schaden damit reduziert. Gleichsam soll die Wirksamkeit der Vorwarnung im Nutzenfall auf hohem Niveau gehalten werden, den Fahrer vor drohenden Kollisionen also noch ausreichend warnen.

Um das Folgekollisionsrisiko zu reduzieren, soll die Bremsstärke derart angepasst werden, dass die Reaktionszeit des Folgefahrzeugfahrers minimiert wird. Dadurch soll sich die Häufigkeit von Folgekollisionen reduzieren. Weiterhin soll die verbleibende Aufprallgeschwindigkeit im Kollisionsfall im Vergleich zu einer nicht angepassten Bremsung zumindest konstant gehalten und damit insgesamt das Risiko reduziert werden. Dies soll unter Berücksichtigung des weiteren Kolonnen-Folgeverkehrs erfolgen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert: Kapitel 2 stellt bestehende Gefahrenbremsysteme sowohl im Serieneinsatz als auch im Forschungsstadium vor. Dabei werden die existierenden Systeme hinsichtlich ihrer Lösung der im vorangegangenen Abschnitt genannten Risiken systematisiert. Dieses Vorgehen dient der Ableitung eigener Ansätze zur Entwicklung eines ganzheitlichen Gefahrenbremssystems.

Um den Auslösealgorithmus risikoadaptiv gestalten zu können, reicht die rein physikalische Modellierung der Verkehrssituation nicht aus. Neben ihr spielen auch das Verhalten und die Wahrnehmung des Fahrers eine zentrale Rolle. Kapitel 3 erarbeitet daher die zur Situationsbeurteilung notwendigen Kenngrößen sowohl aus physikalischer als auch aus menschlicher Sicht. Zu ersterer gehören die notwendigen Abstände für Bremsen und Ausweichen und die Bewertung des Folgeverkehrs sowie der Spurwechsellmöglichkeit. Deren Berechnung ist unter Annahme zeitlich stationärer Bewegungsgleichungen möglich. Für die Verwendung menschlicher Kenngrößen hingegen wird das Reaktionsverhalten des Fahrers – also der Prozess vom Reaktionsauslöser bis zur Aktion – modelliert.

Ihre Anwendung finden die Kenngrößen in der neuartigen Eingriffsstrategie in Kapitel 4, wo sie erstmalig kombiniert zur Situationsbewertung und Integration des Fahrers in die Eingriffsentscheidung verwendet werden. Die entwickelte Vorwarnung sowie die Adaption von Eingriffszeitpunkt und -stärke werden darin zunächst als Einzelkomponenten und anschließend in ihrem Zusammenwirken im Gesamtkonzept vorgestellt. Allen Komponenten gemein ist die eingehende Berücksichtigung des Fahrers sowie der ihn umgebenden Verkehrsteilnehmer und -situation.

Wesentlichen Anteil bei der Entwicklung des vorgestellten Eingriffskonzepts hat dessen Umsetzung im Realfahrzeug. Dazu wird in Kapitel 5 zunächst ein Überblick über den verwendeten Versuchsträger sowie dessen Ausstattung gegeben. Auch die Anwendbarkeit des Systems mit alternativer, seriennäherer Sensorik wird bewertet. Schwerpunkt ist jedoch die aktorische Realisierung der Einzelkomponenten. Dazu ist die Modellierung sowohl der Bremse als auch des Getriebes des Versuchsfahrzeugs notwendig. Entsprechende Steuerungs- beziehungsweise Regelungsstrategien machen diese für das Gefahrenbremssystem und darüberhinausgehende Anwendungen nutzbar.

Neben dem Versuchsträger werden zur Evaluation des entwickelten Konzepts auch simulative Testwerkzeuge angewendet. Diese werden in Kapitel 6 vorgestellt. Mit beiden erfolgt die Auswertung des Systems hinsichtlich der Risiken aus Abschnitt 1.3. Dabei finden unterschiedliche Methodiken Anwendung, die vor den jeweiligen Ergebnissen eingehend beleuchtet werden; darunter subjektive Probandenbewertungen sowie die Auswertung im Simulator und im Realfahrzeug aufgezeichneter Messdaten. Ergebnis des Kapitels ist die Quantifizierung der erarbeiteten Risikoreduktion mithilfe der neuartigen Eingriffsstrategie.

Ein Ausblick auf weiterführende Entwicklungen eines Gefahrenbremssystems in Richtung einer kombinierten Brems- und Ausweichassistenz sowie eine Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse bilden den Abschluss der Arbeit in Kapitel 7.

KAPITEL 2

Systematisierung bestehender Gefahrenbremssysteme

Fahrzeugsysteme, die Kollisionen mit einem vorausfahrenden Fahrzeug durch einen aktiven Bremseneingriff möglichst vermeiden, zumindest aber die Kollisionsfolgen mindern, sind Gegenstand laufender Entwicklungs- und Forschungsprojekte und teilweise bereits im Serieneinsatz. Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, umfasst die ganzheitliche Betrachtung einer autonomen Bremsauslösung neben dem Auffahrrisiko auf das potentielle Kollisionsobjekt eine Reihe weiterer Problemstellungen: das Risiko von Falschauslösungen, Falschwarnungen sowie Folgekollisionen. Ob beziehungsweise wie diese zusätzlichen Risiken im Rahmen der bestehenden Ansätze behandelt werden, soll in diesem Kapitel aufgezeigt werden. Zunächst werden dazu im Jahr 2011 verfügbare Seriensysteme verschiedener Hersteller in alphabetischer Reihenfolge dargestellt. Darauf aufbauend werden auch Systeme aus dem Forschungsbereich, die im Laufe der vergangenen Jahre entwickelt und vorgestellt wurden, eingehend analysiert. Die Systematisierung der bestehenden Ansätze wird dann für die Ableitung eines eigenen Konzepts zur Risikoreduktion genutzt. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse.

2.1 Bewertung bestehender Seriensysteme

AUDI bietet mit dem System „pre sense plus“ ein mehrstufiges Gefahrenbremssystem an. Basis für die Bewertung der Kollisionswahrscheinlichkeit sind Daten von zwei Fernbereichs-Radarsensoren sowie einer Mono-Kamera. Erkennen die Sensoren eine bevorstehende Auffahrkollision, wird der Fahrer im ersten Schritt optisch über eine Anzeige im Kombiinstrument sowie akustisch gewarnt. Gleichzeitig wird im Sinne eines Bremsassistenten die Bremsanlage vorbefüllt und bietet bei Abruf den zur Kollisionsvermeidung notwendigen Bremsdruck. Reagiert der Fahrer jedoch nicht, wird in einer zweiten Stufe ein haptischer Bremsruck zur erneuten Warnung sowie kurz darauf eine erste Teilverzögerung mit circa $-3,0 \text{ m/s}^2$ ausgelöst. Diese verstärkt sich im dritten Schritt bei weiterhin ausbleibender

Fahrerreaktion auf $-5,0 \text{ m/s}^2$. Wird die Auffahrkollision schließlich unvermeidbar, wird eine Vollverzögerung eingeleitet. Zusätzlich wird der nachfolgende Verkehr durch Aktivieren der Warnblinkanlage auf die Bremsung vorbereitet (vgl. [68]).

Zur Beschreibung der zeitlichen Auslöseschwellen wird die so genannte Time to Collision (TTC) verwendet. Diese gibt an, wie viel Zeit unter Beibehaltung der momentanen Relativdynamik zwischen Eigen- und Fremdfahrzeug bis zur Kollision verbleibt. Die Schwellen der Stufen 1 bis 3 des AUDI-Systems sind nicht veröffentlicht, wurden jedoch in einer empirischen Untersuchung ermittelt (vgl. [1]). Dabei zeigt sich, dass das System etwa bei $t_{tc} = 2,1 \text{ s}$ mit der optisch-akustischen Warnung beginnt und den Bremsruck bei $t_{tc} = 1,9 \text{ s}$, die erste Teilbremsung bei $t_{tc} = 1,7 \text{ s}$ und die zweite Teilbremsung bei $t_{tc} = 1,1 \text{ s}$ initiiert. Veröffentlicht ist der Übergang zur Vollbremsung bei einer halben Sekunde vor Kollision – also bei $t_{tc} = 0,5 \text{ s}$. Insgesamt wird jedoch maximal eine Geschwindigkeit von 40 km/h abgebaut (vgl. [7]).

BMW nutzt für das System „Auffahrwarnung mit Anbremsfunktion“ die Daten des für den Abstandsregeltempomaten verbauten Fernbereichs-Radarsensors. Detektiert dieser eine kritische Situation, erfolgt eine zweistufige Fahrerwarnung. Die erste Stufe beschränkt sich dabei auf einen optischen Hinweis sowohl im Kombiinstrument als auch – sofern verbaut – im Head-Up-Display. Wie auch im System von AUDI wird durch die Vorconditionierung der Bremsanlage gleichzeitig die Voraussetzung geschaffen, bei erfolgter Fahrerreaktion die Kollision zu vermeiden. Bleibt die Reaktion jedoch aus und steigt die Kollisionsgefahr weiter an, wird in einer zweiten Stufe eine akustische Warnung ausgegeben und das Fahrzeug mit $-3,0 \text{ m/s}^2$ teilverzögert. Die Bremsung erfolgt maximal für $1,2 \text{ s}$ und baut somit in etwa 13 km/h ab (vgl. [76]). Die TTC-Auslöseschwellen wurden auch hier empirisch für die optische Vorwarnung bei $t_{tc} = 3,4 \text{ s}$ und die Teilbremsung bei $t_{tc} = 1,7 \text{ s}$ ermittelt (vgl. [1]).

Das „Collision Mitigation Brake System“ von **Honda** verwendet zur Objektdetektion ebenfalls einen Fernbereichs-Radarsensor. Sobald das System einen wahrscheinlichen Aufprall auf ein vorausfahrendes Fahrzeug erkennt, wird eine dreistufige Unterstützung ausgelöst. In der ersten Phase bei $t_{tc} = 3,0 \text{ s}$ wird der Fahrer durch eine optische und akustische Warnung auf die drohende Kollision hingewiesen. Bleibt die Auffahrgefahr bestehen, wird das Fahrzeug in der zweiten Phase bei $t_{tc} = 2,0 \text{ s}$ mit einer Teilverzögerung von $-2,5 \text{ m/s}^2$ gebremst. Hinzu kommt eine erneute Fahrerwarnung über ein dreimaliges Rucken am Fahrergurt. Bei Erreichen der Unvermeidbarkeitsgrenze der Kollision – in etwa bei $t_{tc} = 1,0 \text{ s}$ – wird die Verzögerung auf $-6,0 \text{ m/s}^2$ verstärkt (vgl. [22, 41]).

Wie Honda bietet **Mercedes-Benz** ein dreistufiges Gefahrenbremssystem an, die so genannte „PRE-SAFE-Bremse“. Die zur Beurteilung des Kollisionsrisikos notwendigen Daten werden aus der Fusion eines Fernbereichs- und zweier Nahbereichs-Radarsensoren gewonnen. Etwa $2,6 \text{ s}$ vor einer möglichen Kollision werden eine optische und akustische Warnung ausgegeben. Gleichzeitig berechnet der Bremsassistent die zur Unfallvermeidung notwendige Bremskraft. Betätigt der Fahrer schnell das Bremspedal, wird diese eingeregelt. Zeigt der Fahrer jedoch keine Reaktion, wird eine Sekunde später – also bei $t_{tc} = 1,6 \text{ s}$ – das Fahrzeug mit $-4,0 \text{ m/s}^2$ abgebremst. Wiederum eine Sekunde später wird bei weiterhin fehlender Reaktion und bestehender Unfallgefahr eine Vollverzögerung eingeleitet (vgl. [34, 74]).

Volvo nutzt bei seinem Gefahrenbremssystem „Collision Warning with Full Auto Brake“ die Fusion eines Fernbereichs-Radarsensors mit einer Mono-Kamera zur Erkennung einer drohenden Auffahrkollision. Das System arbeitet ähnlich wie die Auffahrwarnung von BMW zweistufig. Zunächst werden eine optische und akustische Fahrerwarnung ausgegeben sowie die Bremsanlage für eine Notbremsung vorkonditioniert. Dies geschieht in etwa bei $t_{tc} = 2,3\text{ s}$ (vgl. [1]). Bleibt die Unfallwahrscheinlichkeit hoch, erfolgt eine Sekunde vor Kollision – also bei $t_{tc} = 1,0\text{ s}$ – eine Vollverzögerung. Abgebaut werden insgesamt maximal 35 km/h (vgl. [17]).

Tabelle 2.1 stellt die vorgestellten Systeme einander gegenüber. Mit * gekennzeichnet sind die empirisch ermittelten Auslöseschwellen.

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Auslöseschwellen bestehender Seriensysteme

Hersteller	Vorwarnung Schwelle	Ausprägung	Teilverzögerung Schwelle	Stärke	Vollverzögerung Schwelle
AUDI	$t_{tc} = 2,1\text{ s}^*$	optisch-akustisch	$t_{tc} = 1,7\text{ s}^*$	$-3,0\text{ m/s}^2$	$t_{tc} = 0,5\text{ s}$
	$t_{tc} = 1,9\text{ s}^*$	haptisch (Bremsruck)	$t_{tc} = 1,1\text{ s}^*$	$-5,0\text{ m/s}^2$	
BMW	$t_{tc} = 3,4\text{ s}^*$	optisch	$t_{tc} = 1,7\text{ s}^*$	$-3,0\text{ m/s}^2$	-
	$t_{tc} = 1,7\text{ s}^*$	akustisch			
Honda	$t_{tc} = 3,0\text{ s}$	optisch-akustisch	$t_{tc} = 2,0\text{ s}$	$-2,5\text{ m/s}^2$	-
	$t_{tc} = 2,0\text{ s}$	haptisch (Gurtrucken)	$t_{tc} = 1,0\text{ s}$	$-6,0\text{ m/s}^2$	
Mercedes-Benz	$t_{tc} = 2,6\text{ s}$	optisch-akustisch	$t_{tc} = 1,6\text{ s}$	$-4,0\text{ m/s}^2$	$t_{tc} = 0,6\text{ s}$
Volvo	$t_{tc} = 2,3\text{ s}^*$	optisch-akustisch	-	-	$t_{tc} = 1,0\text{ s}$

Bewertung hinsichtlich Falschauslöserisiko

Zur Einordnung der genannten Auslöseschwellen und somit zur Bewertung des Falschauslöserisikos werden die in Abbildung 1.3 dargestellten notwendigen Abstände für Bremsen

und Ausweichen ebenfalls in zeitliche Schwellen umgerechnet. Sie entsprechen damit den letztmöglichen Zeitpunkten, zu denen das jeweilige Manöver noch kollisionsvermeidend durchführbar ist. Der Zusammenhang zwischen der Time to Collision t_{tc} sowie dem notwendigen Abstand d_x ergibt sich zu

$$t_{tc} = -\frac{d_x}{v_{x,rel}} . \quad (2.1)$$

Während in Abschnitt 1.3 eine fahrphysikalische Maximalbetrachtung zur Anwendung kommt ($|\bar{a}_x| = |\bar{a}_y| = 9,81 \text{ m/s}^2$), müssen die Modellannahmen für eine realistische Bewertung angepasst werden. Als Bremsenmodell wird ein Totzeitglied mit anschließendem Sprung auf die Maximalverzögerung $a_x = -9,81 \text{ m/s}^2$ verwendet (vgl. [13]). Dieses soll sowohl die tatsächliche Totzeit bis zum Ansprechen des Bremssystems als auch die Schwellzeit bis zum Erreichen der maximalen Verzögerung vereinfacht abbilden. Für das Totzeitglied wird ein Wert von $t_t = 0,5 \text{ s}$ angenommen.

Zur Modellierung des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts wird weiterhin eine konstante mittlere Querbeschleunigung verwendet. Diese wird jedoch aus zwei Gründen in ihrem Absolutwert reduziert. Zum einen liegt während eines Ausweichmanövers die maximale Querbeschleunigung nicht sprunghaft an, sondern baut sich analog zum Lenkwinkel auf und auch wieder ab. Zum anderen wird eine automatisch initiierte Bremsung nur dann als subjektiv falsch empfunden, wenn sie vor einem noch durchführbaren Überholmanöver interveniert, nicht vor einem Ausweichen auf der sprichwörtlich „letzten Rille“. Ein realistischer letztmöglicher Überhol-/ Ausweichzeitpunkt ergibt sich mit der mittleren Querbeschleunigung $\bar{a}_y = 3,5 \text{ m/s}^2$ (vgl. [77]).

Abbildung 2.1 stellt die berechneten letztmöglichen Zeitpunkte für Bremsen und Ausweichen dar. Aufgrund der zeitlichen Modellierung mittels TTC anstelle des Abstands ergibt sich für den Bremszeitpunkt ein linearer und für den Ausweichzeitpunkt ein konstanter Zusammenhang über der Differenzgeschwindigkeit. Die Bremslinie ist um die Totzeit t_t verschoben, sodass sie nicht durch den Ursprung verläuft. Zusätzlich sind die veröffentlichten Brems-Auslöseschwellen³ verschiedener Hersteller in die Abbildung eingetragen. Dabei ist zu beachten, dass diese dem jeweils frühesten Systemeingriff entsprechen. Ist – beispielsweise bei geringen Differenzgeschwindigkeiten – eine spätere Bremsung ausreichend, passen die Seriensysteme ihren Eingriff an die Situation an (vgl. [7]).

Es zeigt sich, dass bei hohen Differenzgeschwindigkeiten alle Vollverzögerungen erst unterhalb des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts erfolgen. Dies ist vor allem auf die verbreitete Auslegung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr von 1968 zurückzuführen, nach der der Fahrer zu jedem Zeitpunkt die Kontrolle über sein Fahrzeug ausüben können muss (vgl. [88]). Eine autonome Bremsung mit maximaler Verzögerung sollte demnach nicht zu einem Zeitpunkt erfolgen, zu dem der Fahrer noch weitere Handlungsalternativen besitzt, sondern erst, nachdem die Unvermeidbarkeitsgrenze der Kollision (Point of no Return) unterschritten ist. In der Konsequenz bedeutet dies, dass das Falschauslöserisiko zwar sehr gering ist, das Auffahrrisiko aber nicht mehr vollständig aufgelöst und die

³Auf eine Darstellung der empirisch ermittelten Schwellen wird aus Übersichtlichkeitsgründen und wegen möglicher Messungenauigkeiten verzichtet.

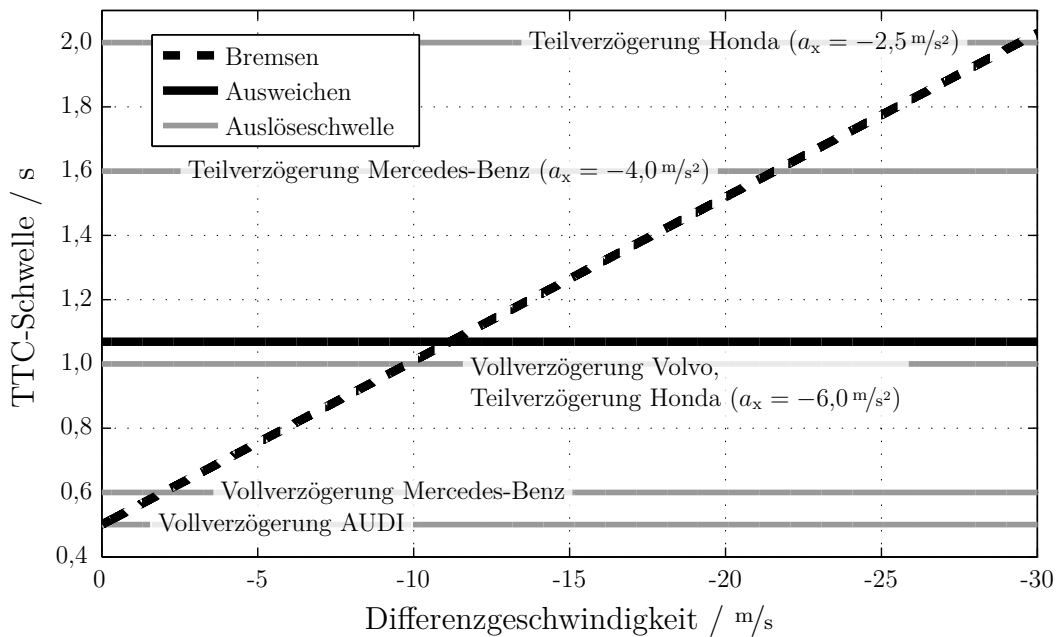


Abbildung 2.1: TTC-Schwellen für kollisionsvermeidendes Bremsen und Ausweichen sowie Auslöseschwellen verschiedener Hersteller

Kollision nicht mehr vermieden werden kann.

Wird der Vollverzögerung eine Teilbremsung wie bei den Systemen von Mercedes-Benz und Honda zu den Auslöseschwellen $t_{tc} = 1,6 \text{ s}$ und $t_{tc} = 2,0 \text{ s}$ vorgelagert, steigt das Falschauslöserisiko an (vgl. [7]). Um zumindest die Auswirkungen einer Falschauslösung auf den Fahrer gering zu halten, wählen die Hersteller bei frühem Eingriff geringe Verzögerungswerte. Die abnehmende Bremsstärke, je früher der Eingriff erfolgt, ist in Abbildung 2.1 ersichtlich.

Bewertung hinsichtlich Falschwarnrisiko

Die genannten Seriensysteme verwenden als Warnelemente vor allem optische und akustische Reize. Zusätzlich sprechen AUDI und Honda durch einen Bremsruck beziehungsweise ein Rucken am Sicherheitsgurt des Fahrers den haptischen Sinneskanal an.

Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, ist die Verzeihlichkeit einer Falschwarnung die maßgebende Größe dafür, wie früh die Warnung ausgesprochen werden kann. In einer Untersuchung im Rahmen des Darmstädter Verfahrens (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wurden eine akustische Warnung, eine Sitzvibration gekoppelt mit einer Anzeige im Kombiinstrument sowie ein Bremsruck hinsichtlich ihrer Verzeihlichkeit unter Berücksichtigung ihrer Wirksamkeit bewertet. Die Sitzvibration kann dabei als Pendant zum Gurtrucken des Honda-Systems gesehen werden. Ausgelöst wurde die Warnung jeweils bei einer zeitlichen Schwelle von $t_{tc} = 2,0 \text{ s}$ (vgl. [39]).

Es zeigt sich, dass die haptischen Varianten (Bremsruck und Sitzvibration) zwar eine hohe subjektive Wirksamkeit besitzen, ihre Verzeihlichkeit bei einer unberechtigten Warnung jedoch sehr gering ist. Die akustische Warnung liegt bei beiden Kategorien im mittleren Be-

reich: Zwar ist ihre Verzeihlichkeit höher als bei den anderen Varianten, ihre Wirksamkeit zugleich aber niedriger (vgl. [39, 40]).

Bei Betrachtung der Warmauslöseschwellen der genannten Seriensysteme wird die Reihenfolge Optik - Akustik - Haptik mit zunehmender Kollisionswahrscheinlichkeit erkennbar. Diese entspricht zum einen einer zunehmenden Wirksamkeit, zum anderen aber einer sinkenden Verzeihlichkeit. Da die Varianten optische und akustische Warnung meist gleichzeitig verwendet werden und dies zeitlich sehr früh geschieht, wird im Falle einer Falschwarnung – beispielsweise beim Ansetzen zu einem Überholvorgang – maximal eine mittlere Verzeihlichkeit erreicht. Lediglich BMW bietet mit der rein optischen Vorwarnung ein sehr verzeihliches Warnelement, das jedoch – vor allem in Ablenkungssituationen – nur eine sehr geringe Wirksamkeit besitzt.

Bewertung hinsichtlich Folgekollisionsrisiko

Zur Bewertung des Folgekollisionsrisikos ist eine Betrachtung des Entwicklungs- und Absicherungsprozesses von Fahrerassistenzsystemen notwendig. Erhebliche Bedeutung nimmt darin die so genannte funktionale Sicherheit ein. Diese ist die Fähigkeit eines elektronischen Systems, im Fehlerfall in einen sicheren Zustand zu wechseln oder dort zu bleiben. Zur Sicherstellung der funktionalen Sicherheit und zur Minimierung des verbleibenden Restrisikos wird unter anderem eine definierte Sicherheitsintegrität gefordert. Diese ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Fehlerfall nicht zu inakzeptablen Risiken führt (vgl. [73]).

Zur Bewertung der Sicherheitsintegrität kommen die so genannten ASIL (Automotive Safety Integrity Levels) – oder deutsch Sicherheitsintegritätslevel – zur Anwendung. Ihre Klassifizierung erfolgt mithilfe einer Gefahrenbewertung und Risikoanalyse und setzt sich zusammen aus

- der Schwere der Fehlerauswirkungen S
(von 1: leichte Verletzungen bis 3: lebensgefährdende Verletzungen),
- der Eintrittswahrscheinlichkeit des Fehlers E
(von 1: sehr geringe Wahrscheinlichkeit bis 4: hohe Wahrscheinlichkeit) sowie
- der Beherrschbarkeit des Fehlers C
(von 1: einfach zu beherrschen bis 3: unbeherrschbar) (vgl. [44]).

Tabelle 2.2 stellt die Zusammensetzung der Integritätslevel aus den unterschiedlichen Einflussfaktoren dar. Die resultierenden ASIL definieren die Sicherheitsanforderungen an das Fahrerassistenzsystem. Werden neue Maßnahmen zur Absicherung hinzugefügt, ist eine erneute Einstufung der Klassen notwendig. Das QM-Kriterium (Qualitätsmanagement) bedeutet, dass die Maßnahmen des normalen Qualitätssicherungsprozesses ausreichend sind und keine zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden müssen (vgl. [73]).

Als für den Folgeverkehr relevanter Fehlerfall lässt sich bei einem Gefahrenbremssystem eine False Positive-Bremmung definieren, beispielsweise ausgelöst durch ein Geisterziel. Dies bedeutet, dass die Bremsung unberechtigt und ohne tatsächliches Auffahrtsrisiko und damit für ein folgendes Fahrzeug sehr überraschend ausgelöst wird. Im schlimmsten anzunehmenden Fall (Worst Case) reagiert der Folgeverkehr nicht und kollidiert – unter der Vorausset-

Tabelle 2.2: Bestimmung der ASIL-Klassen (vgl. [44])

Schwere	Eintritts- wahrscheinlichkeit	Beherrschbarkeit		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	ASIL A
	E4	QM	ASIL A	ASIL B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	ASIL A
	E3	QM	ASIL A	ASIL B
	E4	ASIL A	ASIL B	ASIL C
S3	E1	QM	QM	ASIL A
	E2	QM	ASIL A	ASIL B
	E3	ASIL A	ASIL B	ASIL C
	E4	ASIL B	ASIL C	ASIL D

zung, dass beide Fahrzeuge vor der Bremsung im Folgeverkehr dieselbe Geschwindigkeit hatten – mit der durch das eigene Fahrzeug abgebauten Differenzgeschwindigkeit.

Bei der Analyse der genannten Seriensysteme fällt auf, dass die während der Bremsung maximal abgebauten Geschwindigkeiten nicht mehr als 40 km/h betragen. Dies wird auch in einer vergleichenden Untersuchung verschiedener Systeme bestätigt (siehe [7]). Gemäß der Einstufung des ASIL-Einflussfaktors „Schwere der Fehlerauswirkungen S“ entspricht eine Auffahrkollision mit $v_{\text{rel}} = 20 \text{ km/h}$ bis maximal $v_{\text{rel}} = 40 \text{ km/h}$ der Stufe S2 mit schweren Verletzungen. Würde das Gefahrenbremssystem mehr Geschwindigkeit abbauen, müsste der oben genannte Fehlerfall mit S3 (lebensbedrohliche Verletzungen möglich) bewertet werden (vgl. [44]). Tabelle 2.2 zeigt, dass mit zunehmender Schwere und gleichbleibender Eintrittswahrscheinlichkeit und Kontrollierbarkeit auch die ASIL-Einstufung steigt.

Die aktuellen Auslegungen adressieren das Risiko einer Folgeverkehrskollision also nicht im Sinne der Reduzierung ihrer Eintrittshäufigkeit, sondern durch eine Begrenzung des resultierenden Schadensausmaßes. Dies hat jedoch Auswirkungen auf die Nutzsituation des Gefahrenbremssystems. Muss zur Kollisionsvermeidung mehr als 40 km/h Differenzgeschwindigkeit abgebaut werden, ist dies durch die Limitierung nicht möglich und die Kollision kann nicht vollständig vermieden werden.

Positiv auf die Reaktion des nachfolgenden Verkehrs wirkt sich das Aktivieren der Warnblinkanlage während der Notbremsung aus, wie es beispielsweise AUDI bei seinem System implementiert hat. Auch andere Hersteller nutzen die Möglichkeit, den Folgeverkehr frühzeitig zu warnen. Diese Funktion ist jedoch häufig nicht an das Gefahrenbremssystem gekoppelt, sondern wird in Abhängigkeit der Verzögerung des Fahrzeugs – also auch bei einer starken Bremsung durch den Fahrer – aktiviert (vgl. [12]).

2.2 Bewertung bestehender Systeme im Forschungsstadium

Im Gegensatz zu den Seriensystemen legen die Systeme im Forschungsstadium keine starren Eingriffsschwellen basierend auf TTC-Werten fest, sondern ermitteln dynamisch den Zeitpunkt oder den Abstand für eine kollisionsvermeidende Bremsung sowie für ein kollisionsvermeidendes Ausweichmanöver. Diese entsprechen den bereits eingeführten letztmöglichen Zeitpunkten, zu denen das jeweilige Manöver noch unfallfrei möglich ist. Wird der spätere der beiden unterschritten, ist die Kollision unvermeidbar. Bei höheren Differenzgeschwindigkeiten, die aufgrund des dort auftretenden Eingriffsdilemmas im Fokus der weiteren Betrachtung stehen, geschieht dies bei Unterschreiten des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts.

Als Bemessungsgrundlage, wann die physikalisch letztmöglichen Zeitpunkte erreicht sind, kommen sowohl der räumliche Abstand in Längsrichtung als auch zeitliche Werte zur Anwendung. Neben der Time to Collision, die von den Seriensystemen verwendet wird, ist die so genannte Reaktionszeitreserve eine gängige Größe (vgl. [38, 53]). Im Gegensatz zur TTC, die die verbleibende Zeit bis zur Kollision beschreibt, definiert sie die verbleibende Zeitdauer, bis der Fahrer spätestens zur Kollisionsvermeidung reagieren muss. Sie verläuft parallel zur TTC, ist jedoch um den letztmöglichen Zeitpunkt für Bremsen beziehungsweise Ausweichen verschoben. Abhängig von der gewählten Bemessungsgröße werden die letztmöglichen Zeitpunkte also als Abstands-, TTC- oder Reaktionszeitreserve-Schwellwerte angegeben.

Die Modellierung des letztmöglichen Bremszeitpunkts beruht bei den meisten Ansätzen auf der in Abschnitt 1.2 vorgestellten vereinfachten Bremsweg-Gleichung (1.1). Lediglich einige Systeme berücksichtigen die zusätzlich vorhandenen Tot- und Schwellzeiten. Bei der Modellierung des Ausweichzeitpunkts unterscheiden sich die Systeme hingegen zum Teil wesentlich. Dabei werden komplexe S-förmige (siehe [4, 64, 82]), idealisierte kreisförmige (siehe [38, 55, 58]) sowie empirisch ermittelte Bahnvorgaben (siehe [55, 66]) verwendet. Einen genaueren Überblick über die Modellierungen gibt Abschnitt 3.2.1, in dem der in vorliegender Arbeit verwendete letztmögliche Ausweichzeitpunkt definiert wird.

Aus den gewonnenen Kenngrößen werden unterschiedliche Strategien formuliert. Bei hohen Differenzgeschwindigkeiten kann dabei im Wesentlichen zwischen zwei Gruppen unterschieden werden:

- Ein Eingriff erfolgt bei Erreichen der Unvermeidbarkeit der Kollision, also bei Unterschreiten des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts.
- Ein Eingriff erfolgt bei Erreichen des letztmöglichen Bremszeitpunkts, obwohl ein Ausweichen später noch möglich wäre.

Systeme der ersten Gruppe werden von **Hillenbrand, Karrenberg, Kopischke** und **Lages** vorgestellt. Sie initiieren eine Vollverzögerung, sobald die Kollision als unvermeidbar gilt (vgl. [38, 47, 55, 58]). Die einsetzende Bremsung führt dann nur noch zur Kollisionsfolgenminderung. Dies ist jedoch explizit beabsichtigt, um eine Bevormundung des Fahrers bei

alternativen Handlungsmöglichkeiten zu vermeiden, und entspricht damit der Auslegung der in Abschnitt 2.1 vorgestellten Seriensysteme.

Als Alternative zum Bremseingriff führen **Ameling, Mildner** und **Stählin** bei Erreichen des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts ein vollautonomes Ausweich- oder ein kombiniertes Brems-Ausweich-Manöver durch (vgl. [4, 64, 82]). Aufgrund der aktiven Lenktätigkeit kann die drohende Kollision trotz des späten Eingriffs noch vermieden werden. Für das automatisierte Ausweichen wird eine exakte Trajektorienplanung benötigt. Diese ist jedoch implizit durch die Bestimmung des Ausweichzeitpunkts gegeben. In diesen Fällen finden die oben genannten S-förmigen Bahnvorgaben Verwendung.

Als zusätzliche Kenngröße neben den physikalisch letztmöglichen Zeitpunkten berücksichtigen einige Ansätze die Durchführbarkeit eines Ausweichmanövers, also ob auf der Nachbarspur genügend Platz zur Verfügung steht und dieser gefahrlos erreichbar ist (vgl. [4, 64, 66]). Besteht dort Kollisionsgefahr, wird das Ausweichen als Alternative gesperrt. Unterschiedliche Verfahren zur Erkennung der Ausweichmöglichkeit sowie die in vorliegender Arbeit verwendete Methodik finden sich in Abschnitt 3.2.3.

Die Kenntnis über die Ausweichmöglichkeit nutzen Ameling und Mildner zur Anpassung des Eingriffszeitpunkts. Ist kein Ausweichen möglich, kann eine Bremsung auch initiiert werden, wenn das Ausweichmanöver bezogen auf das vorausfahrende Fahrzeug physikalisch noch später möglich wäre (vgl. [4, 64]). Damit wird ein fließender Übergang von der oben genannten ersten hin zur zweiten Gruppe geschaffen, bei der ein Eingriff bereits zum letztmöglichen Bremszeitpunkt erfolgt. Hier wirkt eine Vollverzögerung kollisionsvermeidend.

Unabhängig davon, ob ein Ausweichen später noch möglich ist, greift das von **Nitz** vorgestellte System stets zum letztmöglichen Bremszeitpunkt ein. Auch hier findet die Kenntnis über die Ausweichmöglichkeit ihre Anwendung. Diese liegt im Gegensatz zu den binären Daten bei Ameling und Mildner (Ausweichen möglich oder nicht möglich) jedoch kontinuierlich vor und wird zur Anpassung der Eingriffsstärke verwendet. Ist genügend Platz auf der Nachbarspur zum Überholen oder Ausweichen vorhanden, führt dies zu einer anfangs sehr schwachen Bremsung. Erst wenn auch der letztmögliche Ausweichzeitpunkt unterschritten ist, wird eine Vollverzögerung eingeleitet. Besteht hingegen keine Ausweichmöglichkeit, greift das System sofort mit einer Vollbremsung ein (vgl. [66]).

Hillenbrand geht in einem zweiten Ansatz einen alternativen Weg in Richtung Kollisionsvermeidung. Auch hier erfolgt die Bremsung bei Erreichen des letztmöglichen Bremszeitpunkts, jedoch nur, wenn die Bremsabsicht des Fahrers zuverlässig erkannt wird. Dazu wird ein Klassifikator vorgestellt, der normale Bremsungen von Gefahrenbremsungen durch den Fahrer unterscheiden kann. Wird letztere erkannt, setzt die Bremsunterstützung ein, obwohl ein späteres Ausweichen theoretisch noch denkbar wäre (vgl. [38]).

Den Eingriffszeitpunkt einer Notbremsung oder eines Notausweichmanövers leiten **Schneider** und Lages in einem zweiten Ansatz mithilfe unscharfer Situationsmodellierungen her. Dabei wird das Fahrer- sowie das Umweltverhalten mit probabilistischen Netzen (siehe [72]) beziehungsweise Fuzzy-Kennfeldern (siehe [58]) nachgebildet und die Notwendigkeit eines Eingriffs abgeleitet. Aufgrund der variablen Verteilung der resultierenden Auslösezeitpunkte und der damit verbundenen schwierigen Beurteilung des Falschauslöse- risikos werden diese Methodiken jedoch nicht weiter betrachtet.

Bewertung hinsichtlich Falschauslöse- und Falschwarnrisiko

Die Systeme im Forschungsstadium der ersten Gruppe, die zum physikalisch letztmöglichen Zeitpunkt eingreifen, orientieren sich analog den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Seriensystemen an der Auslegung des Wiener Übereinkommens. Solange sich der Fahrer für eine alternative Handlungsoption entscheiden kann, obliegt ihm die vollständige Kontrolle über sein Fahrzeug und es erfolgt keine Systemintervention. Eine Bevormundung wird damit ausgeschlossen. Gleichzeitig ist auch das Risiko einer Falschauslösung sehr gering.

Für die rein bremsenden Systeme bedeutet der späte Eingriffszeitpunkt, dass durch die einsetzende Verzögerung das Auffahrrisiko nicht mehr aufgelöst und die Kollision nicht mehr vermieden werden können. Durch die Bereitstellung einer zweiten aktiven Systemhandlung, dem automatisierten Ausweichen, kann diese Problematik beseitigt werden. Wird das Manöver zum letztmöglichen Ausweichzeitpunkt initiiert, kann die Kollision gerade noch vermieden werden. Das Auffahrrisiko sowie das Falschauslöserisiko sind minimal. Dies ist jedoch nur mithilfe des aktiven Lenkeingriffs möglich.

Eine teilweise Auflösung des Eingriffsdilemmas ist in Situationen möglich, in denen keine Ausweich- beziehungsweise Überholmöglichkeit besteht und dies sensorisch erkannt wird. Ein Eingriff kann dann stets zum letztmöglichen Bremszeitpunkt erfolgen und die Kollision ohne die aktive Lenktätigkeit durch Bremsen vermeiden. Das Falschauslöserisiko wird dadurch nicht erhöht, da auch dem Fahrer Ausweichen oder Überholen nicht als Handlungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Alternativ zur Umfeldbeobachtung kann wie bei Hillenbrand auch das Fahrerverhalten analysiert werden. Wird eine durch den Fahrer initiierte Bremsung erkannt, ist keine Überholabsicht zu vermuten. Die Einleitung einer Vollbremsung zum letztmöglichen Bremszeitpunkt kann damit nicht als Falschauslösung gewertet werden.

Wird unabhängig vom beobachteten Umfeld oder Fahrerverhalten die Bremsung stets zum letztmöglichen Bremszeitpunkt ausgelöst (Systeme der zweiten Gruppe), ist das Falschauslöserisiko als hoch einzustufen. Durch eine Adaption der Bremsstärke an den Grad der Ausweichmöglichkeit wie bei Nitz können dann zumindest die Auswirkungen der Falschauslösung auf den Fahrer gering gehalten werden. Dies ähnelt den vorgelagerten Teilbremsungen der Seriensysteme, die jedoch in ihrer Stärke nicht veränderlich sind.

Eine explizite Behandlung der Problematik frühzeitig ausgegebener Warnungen erfolgt bei keinem System. Werden Warnelemente verwendet, entsprechen sie den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Serienlösungen (vgl. [38, 82]). Die Bewertung des Falschauslöserisikos ist äquivalent anwendbar. Viele im Forschungsbereich umgesetzte Systeme verzichten sogar vollständig auf eine Vorwarnung des Fahrers.

Bewertung hinsichtlich Folgekollisionsrisiko

Im von Hillenbrand entwickelten System der ersten Gruppe, das eine Vollverzögerung erst bei Erreichen der Unvermeidbarkeit der Kollision initiiert, findet das Risiko von Folgeverkehrskollisionen im Rahmen der Thematik Produkthaftung Berücksichtigung. Der Vollbremsung wird hier eine Teilverzögerung vorgelagert, die in ihrem Absolutwert für den Folgeverkehr unkritisch ist (vgl. [38]). Dadurch soll der Folgefahrzeugfahrer auf die stärkere Bremsung vorbereitet werden. Dies ist gleichfalls auf alle bereits vorgestellten Serien-

systeme übertragbar, die ebenfalls schrittweise ansteigende Verzögerungsstufen implementiert haben. Die Erkenntnisse von Hillenbrand sind dabei direkt in das Seriensystem von Mercedes-Benz eingeflossen. Ein Abbrechen der Bremsung nach einer maximal abgebauten Geschwindigkeit wird jedoch nicht angegeben. Inwieweit sich diese Strategie positiv auf die Reaktionszeit und Reaktionsstärke des Folgefahrers auswirkt, wird nicht weiter untersucht. Alle anderen Systeme initiieren ihre Bremsung unabhängig vom möglicherweise vorhandenen Folgeverkehr.

2.3 Systematisierung und Ableitung eigener Ansätze

Die vorgestellten Lösungsansätze zur Adressierung des Falschauslöse-, Falschwarn- und Folgekollisionsrisikos, die von den genannten Systemen verfolgt werden, werden im Folgenden zusammengefasst und im Rahmen dieser Arbeit qualitativ gegenübergestellt. Dabei werden die bisher unbearbeiteten Schwerpunkte für ein ganzheitliches Gefahrenbremssystem aufgezeigt. Grundlage für die Systematisierung sind die in Abschnitt 1.3 dargestellten Ziele der Arbeit.

Zur Reduzierung des **Falschauslöserisikos** soll die Bremsauslösung adaptiv an das Verkehrsgeschehen angepasst werden, ohne dabei – in eindeutigen Situationen – auf Kollisionsvermeidung zu verzichten. Abbildung 2.2 stellt die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Systeme daher in den Dimensionen „Wirksamkeit zur Kollisionsvermeidung“ und „Falschauslöserisiko“ gegenüber. Die Betrachtung erfolgt für den Bereich höherer Differenzgeschwindigkeiten, bei denen auch nach Erreichen des letztmöglichen Bremszeitpunkts noch ausgewichen werden kann.

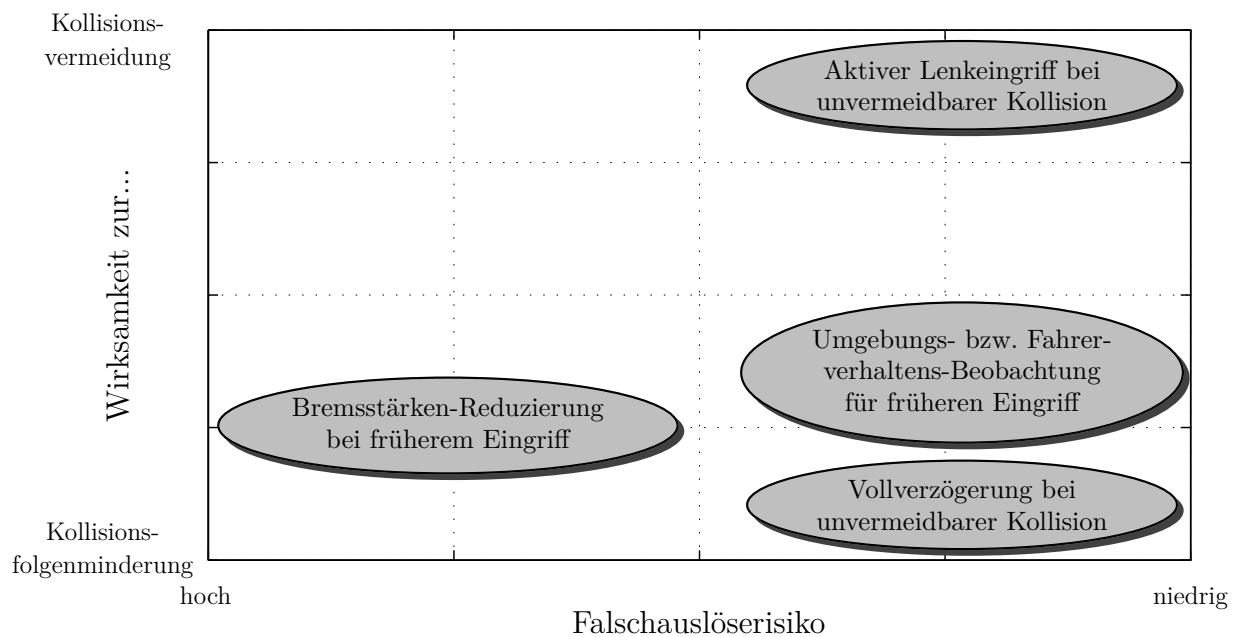


Abbildung 2.2: Qualitative Gegenüberstellung der Lösungsansätze zur Adressierung des Falschauslöserisikos

Großes Potential zur Kollisionsvermeidung sowie zur Minimierung des Falschauslöserisikos hat der aktive Lenkeingriff. Dessen Umsetzung in einem Seriensystem ist jedoch mit hohen rechtlichen Hürden und Anforderungen zur Absicherung verbunden. Am anderen Ende der Wirksamkeitsskala stehen die Systeme, die erst bei Erreichen der Unvermeidbarkeit der Kollision eine Vollverzögerung initiieren. Hier ist das Falschauslöserisiko ebenfalls minimal, jedoch kann die Kollision nicht mehr vermieden werden.

Der schrittweise Aufbau der Verzögerung – also die Implementierung einer der Vollbremsung vorgelagerten Teilbremsung – führt zu einem frühen Systemeingriff und damit zu einem erhöhten Falschauslöserisiko. Im Vergleich zur reinen Vollverzögerung bei Erreichen der Unvermeidbarkeit der Kollision kann die Wirksamkeit jedoch erhöht werden, da auch mit verminderter Bremsstärke bereits Differenzgeschwindigkeit abgebaut wird.

Vielversprechend erscheinen die Beobachtung der Fahrumgebung sowie des Fahrerverhaltens. Werden eindeutige Merkmale festgestellt, erfolgt eine kollisionsvermeidende Verzögerung, die sich nicht auf das Falschauslöserisiko auswirkt. Als Basis bei nicht erkanntem Merkmal liegt diesen Ansätzen jedoch stets eine kollisionsfolgenmindernde Bremsung zugrunde. Das heißt, in Situationen, in denen der Fahrer beispielsweise durch Unaufmerksamkeit keine Bremsreaktion zeigt, wird auch keine Kollisionsvermeidung erreicht. Dasselbe gilt für die Beobachtung der Ausweichmöglichkeit. Ist genügend Platz auf der Nachbarspur, beim Fahrer aber kein Überholwunsch vorhanden, wird dieser Konstellation nicht Rechnung getragen und der Eingriffszeitpunkt nicht nach vorne verschoben.

Während sich die bisherigen Ansätze entweder auf die Beobachtung des Fahrers oder auf die Beobachtung der Umgebung stützen, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein kombinierter Ansatz mit einer zusätzlichen Fahrermodellierung verfolgt. Ausgangsbasis soll dabei möglichst eine kollisionsvermeidende Bremsung darstellen, von der erst nach erkannter oder modellierter Reaktion unter Einbeziehung der Fahrumgebung Abstand genommen wird. Dadurch kann mit einem rein bremsenden System – also ohne Verwendung eines aktiven Lenkeingriffs – in den Situationen, in denen beim Fahrer mit hoher Sicherheit ein Bremswunsch bewusst oder unbewusst vorliegt, der Unfall auch verhindert werden, ohne das Falschauslöserisiko zu erhöhen.

Ziel bei der Adressierung des **Falschwarnrisikos** ist die Implementierung eines Warnelements, das die Verzeihlichkeit einer Falschwarnung unter Berücksichtigung seiner Wirksamkeit maximiert. Abbildung 2.3 stellt die bisherigen Vorwarnungen in diesen Kategorien gegenüber. Gut sichtbar ist der Zusammenhang zwischen Verzeihlichkeit und Wirksamkeit. Während die bisher umgesetzten haptischen Varianten sehr gut die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die kritische Situation lenken, sind sie im Falle einer unberechtigten Auslösung stark irritierend. Im Gegensatz dazu stellt die optische Vorwarnung ein sehr verzeihliches Warnelement dar, hat jedoch vor allem in Ablenkungssituationen auch nur eine minimale Wirksamkeit. In beiden Kategorien erfährt die akustische Warnung eine mittlere Einstufung.

Die Abbildung zeigt gleichzeitig den bisher nicht erreichten Gestaltungsspielraum oberhalb der bisherigen Varianten auf. Dazu scheint die Verwendung und Adaption der bestehenden Lösungen jedoch schwierig. Es wird daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Implementierung eines neuartigen Warnelements angestrebt.

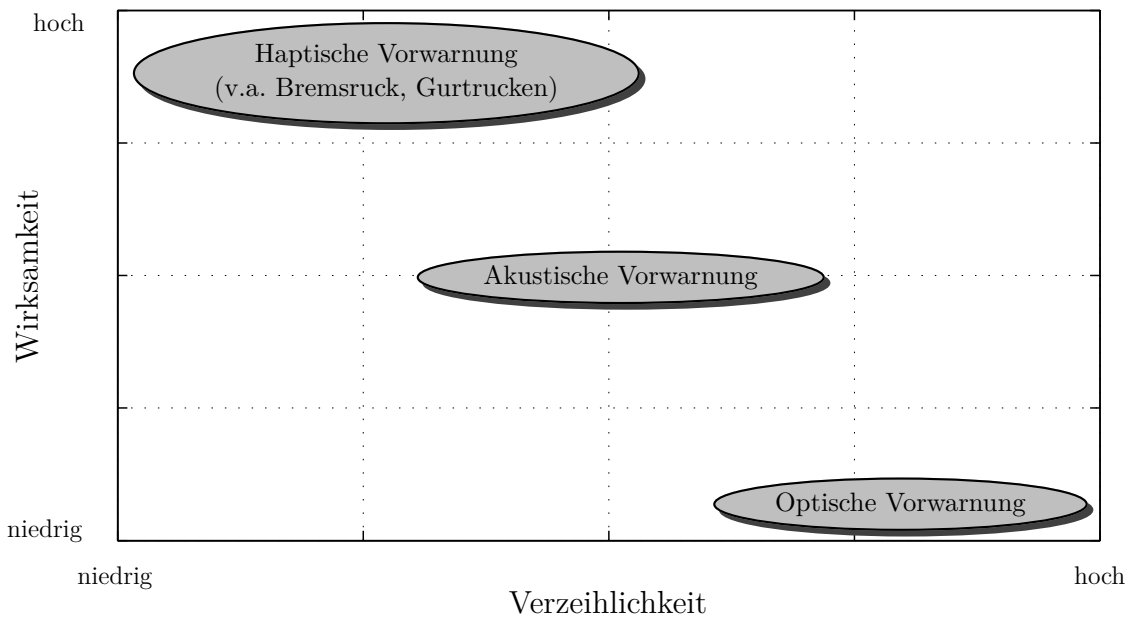


Abbildung 2.3: Qualitative Gegenüberstellung der Lösungsansätze zur Adressierung des Falschwarnrisikos

Zur Reduzierung des **Folgekollisionsrisikos** soll der Bremseneingriff derart angepasst werden, dass dem Folgefahrzeugfahrer eine möglichst starke und schnelle Reaktion abverlangt wird, die ihm seinerseits die Vermeidung der drohenden Auffahrkollision ermöglicht. Weiterhin soll die verbleibende Aufprallgeschwindigkeit im Kollisionsfall zumindest konstant gehalten werden. Abbildung 2.4 stellt dem „Folgekollisionsrisiko“ die Dimension „Vorkonditionierung des Folgefahrers“, also den Grad der Beeinflussung des nachfolgenden Verkehrs gegenüber.

Die durch die funktionale Sicherheit bedingte Lösung der genannten Seriensysteme, den Bremsvorgang nach einer maximal abgebauten Geschwindigkeit abubrechen, hat keine Wirkung im Sinne der Vorwarnung des Folgeverkehrs. Sie zielt vielmehr auf die Minderung der Kollisionsauswirkungen ab. Bei gleichbleibender Eintrittshäufigkeit von Folgekollisionen kann das Risiko damit gesenkt werden.

Wird ergänzend die Warnblinkanlage aktiviert oder die Bremsung mit einer vorgelagerten Teilverzögerung begonnen, steigt die Erkennbarkeit der drohenden Vollbremsung für den Folgeverkehr stark an. Mit der erhöhten Vorkonditionierung des Folgefahrers ist die Vermeidung der Folgeverkehrskollision wahrscheinlicher – das Risiko sinkt weiter. Ob jedoch die Strategie einer schrittweise ansteigenden Verzögerung im Sinne des Folgeverkehrs optimal ist, bleibt bislang unbetrachtet.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht daher die optimale Ausgestaltung einer vorgelagerten Bremsung, die die drohende Vollverzögerung für den Folgeverkehr deutlich macht und dessen Reaktionszeit minimiert. Gleichzeitig soll adaptiv auf die aktuelle Verkehrssituation eingegangen werden und durch eine Anpassung der Stärke sowie des Verlaufs der Bremsung die verbleibende Relativgeschwindigkeit bei Aufprall zumindest konstant

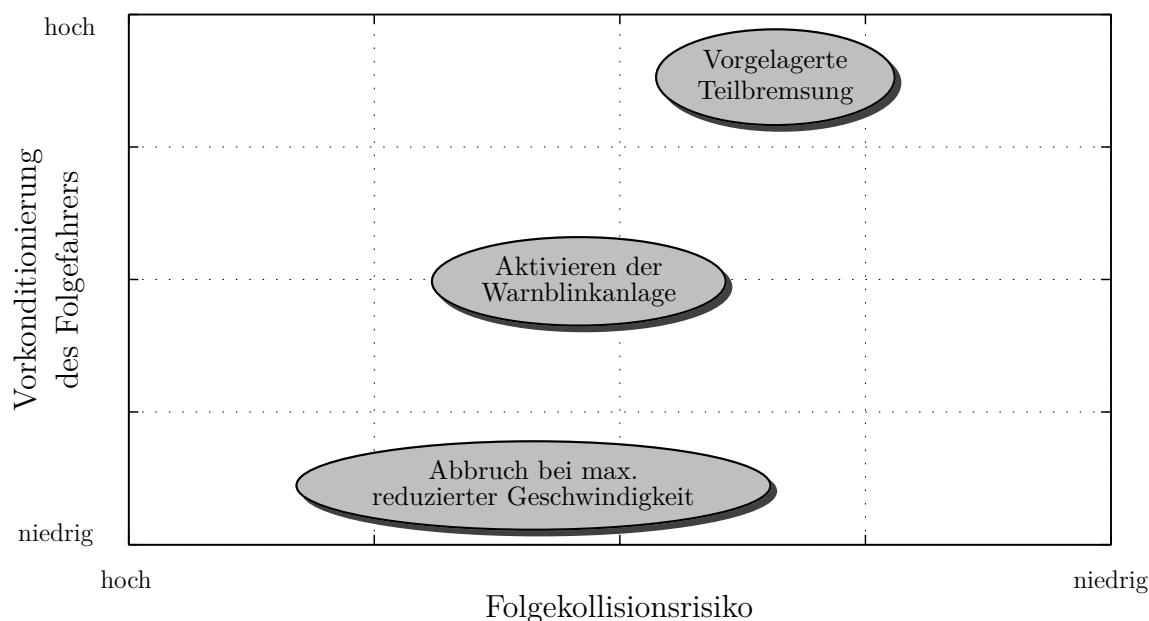


Abbildung 2.4: Qualitative Gegenüberstellung der Lösungsansätze zur Adressierung des Folgekollisionsrisikos

gehalten und somit das Folgekollisionsrisiko insgesamt stark reduziert werden. Dieses bezieht sich dabei nicht nur auf das direkt folgende Fahrzeug, sondern ebenso auf weitere, möglicherweise in Kolonne fahrende Verkehrsteilnehmer.

2.4 Zusammenfassung und Diskussion

Die identifizierten Ansätze sind gut dazu geeignet, das Falschauslöse-, Falschwarn- sowie das Folgekollisionsrisiko, die neben dem Auffahrrisiko die relevanten Problemstellungen im Rahmen der Entwicklung eines ganzheitlichen Gefahrenbremssystems darstellen, zu reduzieren. Die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Risiken führen jedoch dazu, dass eine vollständige Minimierung nicht jederzeit möglich ist. Beispielsweise müsste sich das System bei einer drohenden Auffahrkollision und einem gleichzeitig dicht auffahrenden Folgefahrzeug für das „geringste Übel“, also die weniger schwerwiegende Handlung entscheiden. Auch der Zielkonflikt zwischen Kollisionsvermeidung und Falschauslösung führt dazu, dass die Risiken unterschiedlich gewichtet werden müssen.

Negative Auswirkungen hat eine stark adaptive Strategie möglicherweise auf die Transparenz des Fahrerassistenzsystems. Werden für die Auslöseentscheidung systemseitig andere Kriterien zugrunde gelegt, als es der Fahrer tut, können Schwierigkeiten beim Systemverständnis auftreten. Um dem entgegenzuwirken, ist eine nachgelagerte Plausibilisierung der erfolgten Systemaktion denkbar.

Neben den genannten existieren noch weitere Risiken, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht adressiert werden. Denkbar sind dabei physikalische Grenzen, die beispielsweise bei einem zu knapp vor dem eigenen Fahrzeug auf die Straße laufenden Kind eine

Kollisionsvermeidung verhindern. Auch Risiken innerhalb des Fahrzeugs – beispielsweise das fehlende Anlegen eines Sicherheitsgurts oder das mögliche Herumschleudern loser Teile – werden nicht betrachtet. Erst eine vollständige Detektion der Umwelt würde die Adaption des Bremssystems an diese Risiken möglich machen.

Ableitung von Kenngrößen zur Situationsbewertung

Um ein Gefahrenbremssystem adaptiv gestalten zu können, ist eine genaue Bewertung und Interpretation des Fahrzeugumfelds notwendig. Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten bestehenden Systeme beschränken sich bei ihrer Situationsbewertung meist auf physikalische Größen wie den notwendigen Abstand für ein kollisionsvermeidendes Brems- oder Ausweichmanöver sowie die Belegung der Nachbarspuren. Diese sind auch in der vorliegenden Arbeit wichtige Kenngrößen und werden daher nach einer Einführung der benötigten Grundlagen hergeleitet beziehungsweise auf Basis bestehender Ansätze erläutert und adaptiert. Dass jedoch die rein physikalische Betrachtung nicht ausreicht, zeigt die Tatsache, dass teilweise bereits menschliche Interaktionen wie die Betätigung des Bremspedals in die Algorithmik mit einbezogen werden (siehe [38]). Neben diesen messbaren Größen gibt es jedoch weitere fahrerbezogene Faktoren, deren Kenntnis zur Situationsbeurteilung hilfreich, ihre Messung aber nur schwer oder gar nicht möglich ist. Daher werden zusätzlich neben der Ermittlung der tatsächlichen Fahrerreaktion auch Modelle zur Abschätzung des Reaktionsbedarfs sowie der Reaktionszeit vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Kenngrößen.

3.1 Grundlagen

Zunächst wird ein Überblick über die zugrunde liegende Datenbasis sowie das verwendete Koordinatensystem gegeben. Mithilfe dieser Informationen wird dann die bereits eingeführte Time to Collision als Maß für eine objektive Kritikalitätsbewertung von Verkehrssituationen hergeleitet und ausführlich erläutert. Aus der Vielzahl der um das eigene Fahrzeug erkannten Verkehrsteilnehmer und unter Zuhilfenahme der TTC werden im Anschluss sowohl das potentielle Kollisions- als auch die relevanten Umgebungsobjekte ausgewählt.

3.1.1 Verfügbare Datenbasis und Koordinatensystem

Zur Repräsentation des durch die Sensorik detektierten Fahrzeugumfelds steht dem in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Algorithmus eine so genannte Tracklist, also eine Liste aller um das eigene Fahrzeug erkannter und getrackter (das heißt zeitlich verfolgter) Verkehrsteilnehmer zur Verfügung. Bezugspunkt dieser Objekte ist dabei ein körperfestes Fahrzeugkoordinatensystem, dessen Ursprung sich – in leichter Abwandlung der Vorgaben der DIN 70000 (siehe [75]) – in der Mitte der Frontstoßstange des Egofahrzeugs befindet. Der relative Abstand zwischen Fremd- und eigenem Fahrzeug wird in kartesischen Koordinaten angegeben und bezieht sich auf Seiten des Fremdfahrzeugs auf die dem Koordinatenursprung nähere Fahrzeugmitte (siehe Abbildung 3.1). Zusätzlich sind die Abmessungen sowie die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Fremdfahrzeuge in Längs- und Querrichtung Teil der Objektliste.

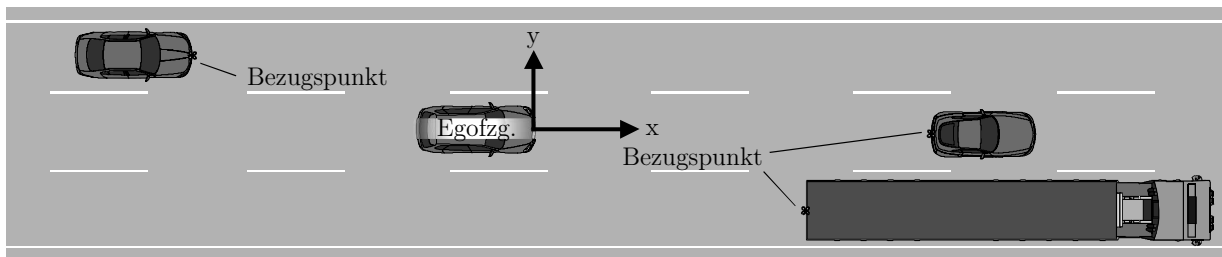


Abbildung 3.1: Koordinatensystem und Bezugsbasis der Fremdfahrzeuge

Vereinfacht wird angenommen, dass die Objekte stets parallel zum eigenen Fahrzeug ausgerichtet sind, also ohne Berücksichtigung ihrer tatsächlichen Orientierung. Für eine Betrachtung im Längsverkehr und vor allem auf Autobahnen, die wegen der dort gefahrenen hohen Geschwindigkeiten für ein Gefahrenbremsssystem von besonderem Interesse sind, kann diese Einschränkung jedoch vernachlässigt werden.

Mögliche Messungenauigkeiten finden in der Algorithmik des Gefahrenbremsystems keine Berücksichtigung, da sie nicht in ausreichender Qualität für alle Messgrößen zur Verfügung stehen.

3.1.2 Verbleibende Zeit bis zur Kollision

Als wesentliches Maß für die Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen werden neben Abstandswerten vor allem zeitbasierte Größen verwendet (vgl. Abschnitt 2.2). Vorteil der zeitlichen Betrachtung ist in erster Linie die geschwindigkeitsunabhängige Beschreibung der Situation (vgl. [42]). In der vorliegenden Arbeit kommt die so genannte Time to Collision, also die verbleibende Zeit bis zu einer drohenden Kollision, zur Anwendung. Sie gibt den prädizierten Zeitpunkt wieder, zu dem sich Ego- und Fremdfahrzeug auf einer gemeinsamen Höhe befinden, das heißt der relative Abstand zu null wird. Zur Berechnung der TTC werden im vorliegenden Ansatz nur Größen in Längsrichtung verwendet. Ob zusätzlich eine Überdeckung in Querrichtung vorliegt, wird bei der Auswahl des potentiellen

Kollisionsgegners in Abschnitt 3.1.3 ermittelt. Die Herleitungen stützen sich dabei auf die Ausführungen von Nitz (siehe [66]).

Für die Bewegungsgleichungen des eigenen sowie des Fremdfahrzeugs ergeben sich durch Annahme einer konstant bleibenden Relativedynamik

$$s_{x,ego}(t) = s_{x,ego,0} + v_{x,ego,0} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_{x,ego,0} \cdot t^2 \text{ und} \quad (3.1)$$

$$s_{x,obj}(t) = s_{x,obj,0} + v_{x,obj,0} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_{x,obj,0} \cdot t^2. \quad (3.2)$$

Der relative Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen über der Zeit ergibt sich dann aus der Differenz der beiden Gleichungen, wobei $d_{x,0}$ den Relativabstand, $v_{x,rel,0}$ die Relativgeschwindigkeit und $a_{x,rel,0}$ die Relativbeschleunigung zwischen den Objekten zum Betrachtungszeitpunkt angeben:

$$\begin{aligned} d_x(t) &= s_{x,obj}(t) - s_{x,ego}(t) \\ &= \underbrace{(s_{x,obj,0} - s_{x,ego,0})}_{d_{x,0}} + \underbrace{(v_{x,obj,0} - v_{x,ego,0})}_{v_{x,rel,0}} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \underbrace{(a_{x,obj,0} - a_{x,ego,0})}_{a_{x,rel,0}} \cdot t^2. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Die Forderung, dass sich die Fahrzeuge nach Ablauf der prädizierten Zeit auf derselben Höhe befinden, führt zu der Bedingung

$$d_x(t = t_{tc}) \stackrel{!}{=} 0, \quad (3.4)$$

und die Lösungen des daraus folgenden Polynoms 2. Grades ergeben sich zu

$$t_{tc,1/2} = \frac{-v_{x,rel,0} \pm \sqrt{v_{x,rel,0}^2 - 2 \cdot a_{x,rel,0} \cdot d_{x,0}}}{a_{x,rel,0}}. \quad (3.5)$$

Im Falle einer sich nicht verändernden Relativgeschwindigkeit und der damit einhergehenden Relativbeschleunigung $a_{x,rel,0} = 0$ werden beide Lösungen singulär und entsprechen damit der bereits eingeführten Gleichung (2.1):

$$t_{tc} = -\frac{d_{x,0}}{v_{x,rel,0}}. \quad (3.6)$$

Aus den errechneten Lösungskandidaten ist im Anschluss durch Plausibilisierung die reale Lösung auszuwählen. Ein negativer Wert entspricht dabei einer Kollision „in der Vergangenheit“ und kann ausgeschlossen werden. Bei mehreren positiven Lösungen ist der betragsmäßig kleinste Wert zu verwenden. Dabei ist insbesondere der Sonderfall zu beachten, dass durch die Annahme einer zeitlich stationären Relativedynamik ein in den Stillstand bremsendes Fremdfahrzeug nicht stehen bleibt, sondern seine Bewegungsrichtung umkehrt und dem Egofahrzeug entgegenkommt (siehe [66]).

3.1.3 Objektauswahl

Die physikalischen Betrachtungen in Abschnitt 3.2 beziehen sich auf im Voraus ausgewählte Objekte. Die Berechnungen zum letztmöglichen Brems- und Ausweichzeitpunkt werden für das Objekt durchgeführt, dessen Position sich innerhalb der eigenen Fahrzeugtrajektorie befindet und dadurch als potentieller Kollisionsgegner eingestuft werden kann. Für die Bewertung der Folgeverkehrskritikalität sowie der Ausweichmöglichkeit werden die Fahrzeuge ermittelt, die sich in unmittelbarer Umgebung neben und hinter dem Egofahrzeug befinden. Das detaillierte Vorgehen zur Auswahl wird im Folgenden beschrieben.

Potentiell Kollisionsobjekt

Um ein Umgebungsobjekt als potentiellen Kollisionsgegner einzuordnen, wird ein mehrstufiges Verfahren angewandt. Dieses besteht aus drei Schritten (vgl. [66]):

1. Vorauswahl,
2. Bestimmung des kürzesten Abstands zur Bahnkurve des Egofahrzeugs und Normierung sowie
3. Plausibilisierung mittels TTC in Längsrichtung.

Im Rahmen der Vorauswahl werden bestimmte Grundvoraussetzungen überprüft. So muss sich das Objekt innerhalb eines bestimmten Bereichs vor dem eigenen Fahrzeug befinden und sich in dieselbe Fahrtrichtung bewegen. Entgegenkommende Fahrzeuge werden aufgrund des hohen Unfallrisikos bei einer möglichen Bremsung während eines Überholmanövers systemseitig ausgeschlossen.

Im zweiten Schritt wird der kürzeste euklidische Abstand d^* zwischen Fremdfahrzeug und prädizierter Bahnkurve des eigenen Fahrzeugs mit der Krümmung κ_{ego} bestimmt. Dieser ergibt sich zu

$$d^* = \left\| \begin{pmatrix} d_x \\ d_y - \frac{1}{\kappa_{\text{ego}}} \end{pmatrix} \right\|_2 - \frac{1}{\kappa_{\text{ego}}} , \quad (3.7)$$

wobei d_x den relativen Abstand zwischen eigenem und Fremdfahrzeug in Längsrichtung und d_y selbigen in Querrichtung angeben (vgl. [66]).

Der maximal zulässige Abstandswert resultiert aus den jeweils halben Objektbreiten des Egofahrzeugs b_{ego} sowie des potentiellen Kollisionsgegners b_{obj} zu

$$d_{\text{max}}^* = \frac{1}{2} \cdot (b_{\text{ego}} + b_{\text{obj}}) \quad (3.8)$$

und führt nach Normierung und einer zusätzlich möglichen Ausweitung des erlaubten Fahrtrichters in Abhängigkeit der Eigenfahrzeuggeschwindigkeit und des Objektabstands (in der Formel nicht berücksichtigt, siehe [66]) zur Kollisionsgefahr $p_{\text{koll,ego}} \in [0,1]$:

$$p_{\text{koll,ego}} = \begin{cases} 1 - \left| \frac{d^*}{d_{\text{max}}^*} \right| & \text{für } |d^*| \leq d_{\text{max}}^* \\ 0 & \text{für } |d^*| > d_{\text{max}}^* \end{cases} . \quad (3.9)$$

Durch Vorgabe eines parametrisierten Schwellwerts für $p_{\text{koll,ego}}$ kann ein Fahrzeug dann als potentielles Kollisionsobjekt klassifiziert werden. Gerade im dichten Verkehr besteht jedoch die Möglichkeit, dass diese Schwelle von mehreren, sich vor dem eigenen Fahrzeug befindlichen Objekten überschritten wird. Aus diesem Grund wird im dritten Schritt die bereits berechnete TTC zur Plausibilisierung genutzt. Liegen mehrere Objekte mit hoher Kollisionsgefahr vor, so wird dasjenige Hindernis als systemrelevant gewählt, das die niedrigste TTC aufweist.

Folge- und Nebenspurobjekte

Während beim potentiellen Kollisionsobjekt die Auslösung der Gefahrenbremsung auf das zeitkritischste Hindernis ausgerichtet wird, ist bei der Auswahl der Umgebungsobjekte neben und hinter dem Egofahrzeug der Abstand das maßgebende Kriterium. Zunächst müssen die Objekte jedoch ihrer jeweiligen Spur zugeordnet werden. Unterschieden wird dabei zwischen der Nachbarspur links und rechts sowie der Eigenspur. Der ungefilterte Querabstand zu den erkannten Objekten d_y reicht zur Spurzuordnung allerdings nicht aus. Gerade in Kurvenfahrten kann dieser Wert völlig von der relativen Bezugsbasis des Eigenfahrzeugs abweichen (vgl. Abbildung 3.2). Aus diesem Grund ist es notwendig, die ermittelten lateralen Abstände um die selbst gefahrene Bahnkrümmung κ_{ego} sowie den Schwimmwinkel des Eigenfahrzeugs β_{ego} zu korrigieren (vgl. [71]):

$$d_{y,\text{korrr}} = d_y - \left(\beta_{\text{ego}} \cdot d_x + \frac{1}{2} \cdot \kappa_{\text{ego}} \cdot d_x^2 \right) . \quad (3.10)$$

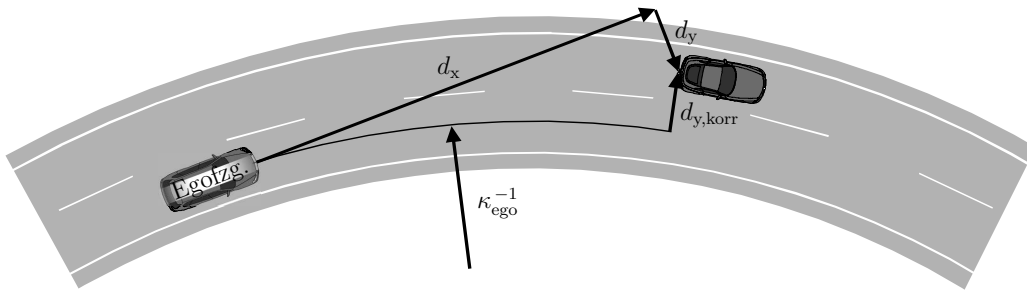


Abbildung 3.2: Gegenüberstellung von korrigiertem und unkorrigiertem Querabstand

Unter Annahme einer definierten Spurbreite und unter Beachtung von Hysteresegrenzen kann dann mithilfe des korrigierten Werts $d_{y,\text{korrr}}$ die Spurzuordnung vorgenommen werden⁴. Objekte, die keiner der drei genannten Spuren zuordenbar sind, werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Nach der Einteilung in Querrichtung erfolgt eine weitere Aufteilung in Längsrichtung. Zusammengefasst resultieren die relevanten Bereiche vor dem Egofahrzeug links und rechts, neben dem Egofahrzeug links und rechts sowie hinter dem Egofahrzeug links, rechts und auf derselben Spur. Innerhalb dieser Bereiche wird jeweils das Objekt ausgewählt, das den betragsmäßig kleinsten Abstand zum Egofahrzeug in Längsrichtung aufweist.

⁴Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Index $(\cdot)_{\text{korrr}}$ für den lateralen Abstand nicht mehr explizit angegeben.

3.2 Physikalische Rahmenbedingungen

In diesem Abschnitt werden die physikalischen Rahmenbedingungen, die zur Situationsbeurteilung notwendig sind, eingehend betrachtet. Dazu gehören neben den notwendigen Abständen für ein letztmöglich kollisionsvermeidendes Bremsen und Ausweichen auch die Bewertung eines möglicherweise vorhandenen Folgefahrzeugs sowie der Belegung der Nachbarspuren. Grundlage für die Berechnungen sind die im Rahmen der TTC-Herleitung in Abschnitt 3.1.2 bereits eingeführten Bewegungsgleichungen (3.1) und (3.2), die aufgrund der Unkenntnis über die zukünftige Relativedynamik von zeitlich stationären Beschleunigungen ausgehen.

3.2.1 Notwendige Abstände für Bremsen und Ausweichen

Im Rahmen der Bewertung des Falschauslöserisikos bestehender Seriensysteme in Abschnitt 2.1 wurden bereits realitätsnahe Modelle zur Bestimmung der notwendigen Abstände beziehungsweise Zeitpunkte für letztmögliches Bremsen und Ausweichen vorgestellt. Diese Modelle sollen nun ausführlich hergeleitet und zur weiteren Verbesserung der Ergebnisse an die tatsächlich vorliegende Situation adaptiert werden.

Die resultierenden Abstände skalieren dabei direkt proportional mit dem zur Verfügung stehenden Fahrbahnreibungswert μ . Da dieser Wert nicht direkt gemessen, sondern lediglich geschätzt werden kann, und selbst die Kenntnis über den aktuellen Wert keine Auskunft über die Reibung auf der Bremsstrecke gibt, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit konservativ (im Sinne des Falschauslöserisikos) von einem hohen Fahrbahnreibungswert $\mu = 1$ ausgegangen. Dies verhindert, dass aufgrund einer falschen Schätzung eine Vollverzögerung zu früh ausgelöst wird. Die Skalierung der berechneten Werte mit μ wird in den Formeln nicht mehr explizit angegeben.

Notwendiger Abstand für letztmöglich kollisionsvermeidendes Bremsen

Im idealen Nutzenfall soll eine systemseitig initiierte Vollbremsung dazu führen, dass das Eigenfahrzeug direkt hinter dem potentiellen Kollisionsgegner dieselbe Geschwindigkeit erreicht und somit den Unfall vermeidet und das Auffahrerisiko minimiert. Dazu ist die Kenntnis über den notwendigen Abstand für letztmöglich kollisionsvermeidendes Bremsen notwendig. Das Erreichen dieses Abstands wird im weiteren Verlauf auch als letztmöglichster Bremszeitpunkt bezeichnet.

Der Aufbau der Verzögerung während eines Bremsvorgangs zeigt einen dreistufigen Verlauf: Totzeit, Schwellzeit und Vollverzögerung. Dieses Verhalten lässt sich als abschnittsweise linearer Zeitverlauf modellieren. Dabei wird bei den bisherigen Implementierungen davon ausgegangen, dass die Verzögerung stets im Nullpunkt beginnt (vgl. [66, 99]). Diese Annahme kann jedoch in vielen Fällen, in denen der Fahrer vor der notwendigen Bremsung beispielsweise beschleunigt oder durch Wegnahme des Fahrpedals und Aufbauen von Schleppmoment bereits verzögert, zu falschen Werten für den notwendigen Bremsabstand führen.

Das in der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegte relative Verzögerungsverhalten während der Bremsung (siehe Abbildung 3.3) ergibt sich daher unter Berücksichtigung der zum Zeitpunkt t_0 bereits vorhandenen Beschleunigung $a_{x,ego,0}$ weiterhin dreiteilig zu

$$a_{x,rel}(t) = a_{x,obj,0} - \underbrace{\begin{cases} a_{x,ego,0} & \text{für } t \leq t_t \\ a_{x,ego,0} - \frac{g}{t_s} \cdot (t - t_t) & \text{für } t_t < t \leq t_t + t_s \cdot \left(1 + \frac{a_{x,ego,0}}{g}\right) \\ -g & \text{für } t_t + t_s \cdot \left(1 + \frac{a_{x,ego,0}}{g}\right) < t \end{cases}}_{a_{x,ego}(t)}, \quad (3.11)$$

wobei die Verzögerung des Fremdfahrzeugs $a_{x,obj,0}$ als zeitlich stationär betrachtet wird und t_t die Totzeit bis zum Ansprechen der Bremse sowie t_s die Schwellzeit vom Nullpunkt bis zur Vollverzögerung $a_{\min} = -g = -9,81 \text{ m/s}^2$ beschreiben. Der zusätzliche Anteil der Schwellzeit, der sich aus der bereits bestehenden positiven oder negativen Beschleunigung ergibt, wird durch den Term $t_s \cdot a_{x,ego,0}/g$ wiedergegeben. Die tatsächlichen Werte für Tot- und Schwellzeit sind individuell im jeweiligen Fahrzeug zu ermitteln. Erfahrungsgemäß ergeben sich Werte im Bereich von $t_t = 0,3 \text{ s}$ und $t_s = 0,7 \text{ s}$ (vgl. [66]).

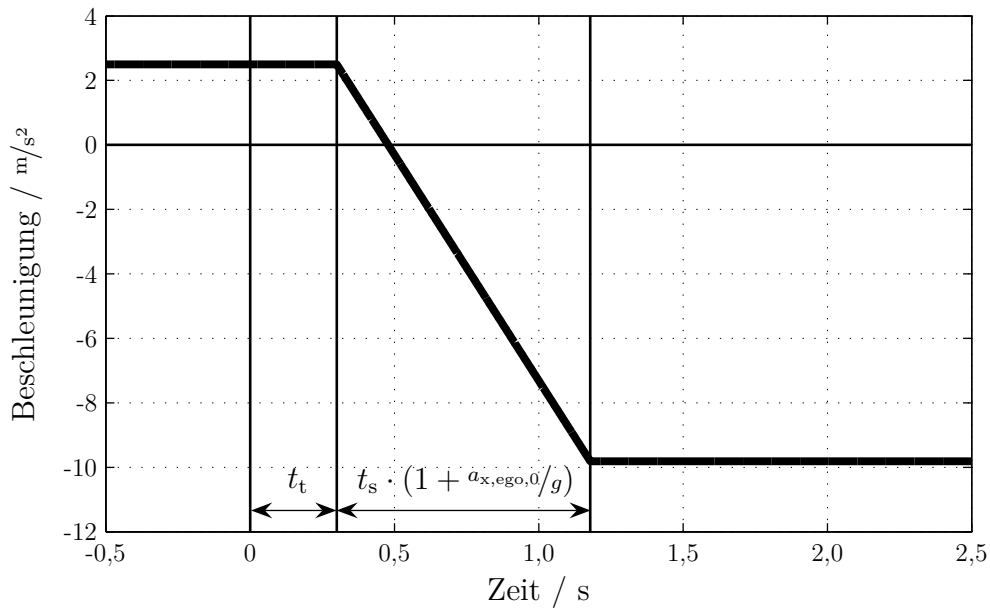


Abbildung 3.3: Dreistufiger Verzögerungsverlauf des Eigenfahrzeugs ausgehend von bereits vorhandener Beschleunigung

Die Forderung, dass die Relativgeschwindigkeit zum Ende der Bremsung abgebaut ist, führt zu der Bedingung

$$v_{x,rel}(t = t_{\text{brems}}) = v_{x,rel,0} + \int_0^{t_{\text{brems}}} a_{x,rel}(t) dt \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.12)$$

und ermöglicht durch Einsetzen des Verzögerungsprofils während der Bremsung die Berechnung der Bremsdauer t_{brems} . Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 bei der Herleitung der TTC ist auf den Sonderfall zu achten, dass das Fremdfahrzeug während seiner Bremsung

möglicherweise zum Stehen kommt. In diesem Fall entspricht die Bremsdauer der benötigten Zeit, um am ermittelten Haltepunkt ebenfalls in den Stillstand zu gelangen (siehe [66]).

Der notwendige Abstand für die kollisionsvermeidende Bremsung $d_{x,\text{brems}}$ ergibt sich dann nach Einsetzen der Bremsdauer in die Bewegungsgleichung

$$d_{x,\text{brems}}(t = t_{\text{brems}}) = v_{x,\text{rel},0} \cdot t_{\text{brems}} + \iint_0^{t_{\text{brems}}} a_{x,\text{rel}}(t) (dt)^2 \quad (3.13)$$

und lässt sich analog den Berechnungen in Abschnitt 3.1.2 in einen TTC-Schwellwert umrechnen.

Notwendiger Abstand für letztmögliches Ausweichen

Neben dem notwendigen Bremsabstand kommt auch dem notwendigen Abstand in Längsrichtung für letztmögliches Ausweichen erhebliche Bedeutung zu. Erfolgt der Eingriff an diesem Punkt, kann das Falschauslöserisiko minimiert werden. Die einsetzende Bremsung wirkt im Bereich hoher Differenzgeschwindigkeiten dann nur noch kollisionsfolgenmindernd. Der Ausweichabstand hängt dabei entscheidend von der Wahl des Bahnverlaufs in Querrichtung ab. Wie in Abschnitt 2.2 bereits erwähnt, kommen bislang vor allem S-förmige, empirisch ermittelte sowie idealisierte kreisförmige Bahnvorgaben zur Anwendung, die im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

Zielsetzung bei der Modellierung der S-förmigen Bahnverläufe ist hauptsächlich die Gewährleistung eines stetigen Lenkwinkel- oder Querbeschleunigungsprofils. Verwendet werden dazu die Aneinanderreihung von Klothoidenabschnitten (siehe [4]) sowie trigonometrische (siehe [64]) oder Hyperbel-Funktionen (siehe [82]). Zur Ermittlung des Ausweichabstands werden diese Funktionen dann mithilfe von Polynomen höheren Grades approximiert.

Nitz und Kopischke verwenden empirisch ermittelte Ausweichvorgänge zur realitätsnahen Modellierung. Ersterer stellt dabei einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Ausweichbreite und Ausweichdauer und einen inversen Zusammenhang zwischen Dauer und Geschwindigkeit fest (vgl. [66]). Bei Kopischke wird der notwendige Abstand aus den ermittelten Stützstellen mittels Spline-Interpolation errechnet (vgl. [55]).

Hillenbrand, Kopischke in einem zweiten Ansatz und Lages nutzen für die Ausweichtrajektorie ein idealisiertes Modell, das davon ausgeht, dass das Eigenfahrzeug sprunghaft in eine stationäre Kreisfahrt übergehen kann. Der Kurvenradius ergibt sich dabei aus der Vorgabe einer zulässigen Zentripetal- oder Querbeschleunigung (vgl. [38, 55, 58]).

Die komplexen S-förmigen sowie die empirisch ermittelten Bahnvorgaben haben den Nachteil, dass für ihre Berechnung ein erheblicher Aufwand betrieben werden muss, der zur reinen Bestimmung des notwendigen Abstands in Längsrichtung nicht gerechtfertigt und auf einem Seriensteuergerät auch nur schwer durchführbar scheint. Notwendig wird eine derartige Ermittlung erst, wenn der Bahnverlauf direkt zur Vorgabe eines autonomen Lenkeingriffs genutzt wird. In vorliegender Arbeit wird daher analog den idealisierten kreisförmigen Modellen eine Ausweichparabel genutzt (vgl. [92]), die lediglich das Auslenken

vor dem potentiellen Kollisionsgegner, nicht aber das Zurücklenken auf der Nachbarspur beschreibt.

Der Ausweichparabel wird die allgemeine Beschreibung

$$s_{y,\text{ausw}}(s_x) = A_1 \cdot s_x^2 + A_2 \cdot s_x + A_3 \quad (3.14)$$

zugrunde gelegt, worin $s_{y,\text{ausw}}$ die Querablage und s_x die Längskoordinate bezeichnen. Die Parameter A_1 , A_2 und A_3 können dann anhand der Randbedingungen ermittelt werden. Zum einen gilt für die Querablage zu Beginn des Manövers $s_{y,\text{ausw}}(s_x = 0) = 0$ und zum anderen besitzt das Egofahrzeug anfangs ausschließlich eine relative Geschwindigkeitskomponente in Längsrichtung und führt noch keine Querbewegung aus, weshalb $s'_{y,\text{ausw}}(s_x = 0) = 0$ gilt. Für das Fremdfahrzeug gilt die Annahme, dass es sich ebenfalls lediglich in Längsrichtung bewegt. Aus diesen Forderungen ergeben sich sofort $A_2 = A_3 = 0$.

Unter der Annahme einer konstanten mittleren Querbewegung \bar{a}_y und einer gleichbleibenden Längsgeschwindigkeit $v_{x,\text{rel}}$ über der Zeit ergibt sich

$$\ddot{s}_{y,\text{ausw}}(t) = \bar{a}_y \quad (3.15)$$

und nach zweimaliger Integration

$$\dot{s}_{y,\text{ausw}}(t) = \bar{a}_y \cdot t + K_{\text{int},1} \text{ und} \quad (3.16)$$

$$s_{y,\text{ausw}}(t) = \frac{1}{2} \cdot \bar{a}_y \cdot t^2 + K_{\text{int},1} \cdot t + K_{\text{int},2} . \quad (3.17)$$

Mithilfe von $s_x = v_{x,\text{rel}} \cdot t$ und Gleichsetzen der Gleichungen (3.14) und (3.17) ergibt sich durch Koeffizientenvergleich $A_1 = \frac{1}{2} \cdot \bar{a}_y / v_{x,\text{rel}}^2$ und damit schließlich für die parabelförmige Ausweichbahn

$$s_{y,\text{ausw}}(s_x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{a}_y}{v_{x,\text{rel}}^2} \cdot s_x^2 . \quad (3.18)$$

Die gewünschte Querablage, die zum erfolgreichen Durchführen des Ausweichmanövers überwunden werden muss, ergibt sich aus den Objektbreiten des eigenen Fahrzeugs b_{ego} und des Fremdfahrzeugs b_{obj} sowie einem möglicherweise vorhandenen Querversatz des Hindernisses gegenüber der eigenen Fahrzeugmittellachse d_y , wobei sich dessen Vorzeichen danach richtet, ob ein Ausweichmanöver nach links oder nach rechts zugrunde gelegt wird:

$$b_{y,\text{ausw}} = \frac{1}{2} \cdot (b_{\text{ego}} + b_{\text{obj}}) \pm d_y . \quad (3.19)$$

Der benötigte Abstand für ein Ausweichmanöver in Längsrichtung $d_{x,\text{ausw}}$ ergibt sich dann aus der Forderung

$$s_{y,\text{ausw}}(s_x = d_{x,\text{ausw}}) \stackrel{!}{=} b_{y,\text{ausw}} \quad (3.20)$$

zu

$$d_{x,\text{ausw}} = v_{x,\text{rel}} \cdot \sqrt{\frac{(b_{\text{ego}} + b_{\text{obj}}) \pm 2 \cdot d_y}{\bar{a}_y}} . \quad (3.21)$$

Wie bereits erwähnt, berücksichtigt der vorgestellte Algorithmus lediglich das Ausweichen vor dem Hindernis, nicht aber das Gegenlenken auf der Nachbarspur. Es bietet sich daher an, die mittlere Querbeschleunigung – wie auch in Abschnitt 2.1 vorgeschlagen – mit einem Wert von $\bar{a}_y = 3,5 \text{ m/s}^2$ entsprechend niedrig anzusetzen und auf diese Weise dem kontinuierlichen Auf- und Abbauen der Querbeschleunigung Rechnung zu tragen.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten durch eine Begrenzung der maximalen Lenkwinkelrate die angenommene mittlere Querbeschleunigung nicht erreicht werden kann. Aus diesem Grund ist sie im unteren Geschwindigkeitsbereich linear mit der Geschwindigkeit zu skalieren. Wie der Bremsabstand lässt sich auch der notwendige Abstand für ein Ausweichmanöver in Längsrichtung in einen TTC-Schwellwert, den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt, umrechnen.

Gegenüberstellung

Abbildung 3.4 stellt die notwendigen Abstände für Bremsen und Ausweichen bei einer anfangs unbeschleunigten Fahrt mittig auf ein stehendes, 2 m-breites Hindernis einander gegenüber. Der nichtlineare Verlauf des notwendigen Ausweichabstands im geringen Geschwindigkeitsbereich ist auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit der angenommenen Querbeschleunigung zurückzuführen, hat jedoch auf den Schnittpunkt der beiden Kurven fast keinen Einfluss. Es zeigt sich, dass nach realitätsnaher Modellierung das Eingriffsdilemma und damit das Risiko von Falschwarnung und -auslösung bereits sehr früh ab einer Differenzgeschwindigkeit von circa $v_{x,\text{rel}} = 9 \text{ m/s} \approx 32 \text{ km/h}$ beginnen.

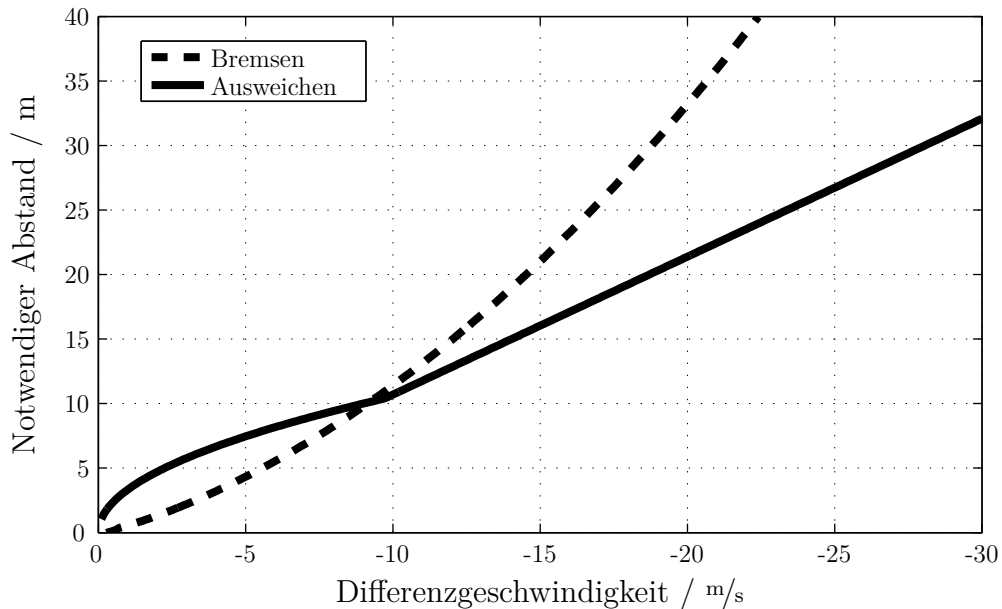


Abbildung 3.4: Notwendiger Abstand für kollisionsvermeidendes Bremsen und Ausweichen nach detaillierter Modellierung

3.2.2 Folgeverkehrsbewertung

Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, können dem eigenen Fahrzeug folgende Verkehrsteilnehmer im Fall einer aktiven Bremsauslösung ein erhebliches Risiko im Sinne einer Folgeverkehrskollision darstellen. Um geeignet auf diese Fahrzeuge reagieren zu können, ist zunächst die Bewertung ihrer Kritikalität notwendig.

Grundlage für die Folgeverkehrsbewertung ist die notwendige Verzögerung $a_{x,obj,soll}$, mit der der Folgefahrzeugfahrer eine Kollision im Fall einer Vollbremsung des Egofahrzeugs gerade noch vermeiden kann. Vereinfacht wird dabei angenommen, dass die eigene Bremsauslösung sprunghaft auf die Maximalverzögerung $a_{min} = -g = -9,81 \text{ m/s}^2$ erfolgt. Während der Bremsung reduziert das Egofahrzeug seine Geschwindigkeit auf einen Sollwert $v_{x,ego,soll}$, der sich aus der Geschwindigkeit des bremsauslösenden Hindernisses vor dem Fahrzeug ergibt. Die Dauer der Bremsung bestimmt sich damit zu

$$t_{brems,ego} = \frac{v_{x,ego,soll} - v_{x,ego,0}}{a_{min}} . \quad (3.22)$$

Unter Berücksichtigung einer angenommenen Reaktionszeit $t_{reakt,obj}$ für den Fahrer des Folgefahrzeugs, während derer von einer konstanten Ausgangsbeschleunigung $a_{x,obj,0}$ ausgegangen wird, ergibt sich das relative Verzögerungsverhalten während des Annäherungsmanövers aus

$$a_{x,ego}(t) = \begin{cases} -g & \text{für } t \leq t_{brems,ego} \\ 0 & \text{für } t > t_{brems,ego} \end{cases} \quad \text{und} \quad (3.23)$$

$$a_{x,obj}(t) = \begin{cases} a_{x,obj,0} & \text{für } t \leq t_{reakt,obj} \\ a_{x,obj,soll} & \text{für } t > t_{reakt,obj} \end{cases} \quad (3.24)$$

zu

$$a_{x,rel}(t) = a_{x,obj}(t) - a_{x,ego}(t) . \quad (3.25)$$

Aus der Forderung, dass das Folgefahrzeug spätestens auf Höhe des Fahrzeughecks des eigenen Fahrzeugs dieselbe Geschwindigkeit erreicht haben soll, ergeben sich die Bedingungen

$$v_{x,rel}(t = t_{tc}^*) = v_{x,rel,0} + \int_0^{t_{tc}^*} a_{x,rel}(t) dt \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{und} \quad (3.26)$$

$$d_x(t = t_{tc}^*) = d_{x,0} + v_{x,rel,0} \cdot t_{tc}^* + \iint_0^{t_{tc}^*} a_{x,rel}(t) (dt)^2 \stackrel{!}{=} -l_{ego} , \quad (3.27)$$

wobei t_{tc}^* der Zeit bis zum Kontakt entspricht, die im Unterschied zur in Abschnitt 3.1.2 berechneten Zeit aufgrund des Vorwissens über den zukünftigen relativen Verzögerungsverlauf nicht von vollständig, sondern von abschnittsweise zeitlich stationären Beschleunigungen ausgeht.

Unter der Annahme, dass die Berührung erst nach Ablauf der Bremsdauer $t_{brems,ego}$ erfolgt – also $t_{tc}^* > t_{brems,ego}$ – lassen sich aus den Gleichungen (3.26) und (3.27) t_{tc}^* sowie schließlich die notwendige Verzögerung zur Kollisionsvermeidung für das Folgefahrzeug $a_{x,obj,soll}$ berechnen:

$$a_{x,obj,soll} = \frac{v_{x,ego,soll} - (v_{x,obj,0} + a_{x,obj,0} \cdot t_{reakt,obj})}{t_{tc}^* - t_{reakt,obj}} . \quad (3.28)$$

Der ermittelte Wert der notwendigen Verzögerung des Folgefahrzeugs wird dann auf einen Kritikalitätswert $p_{\text{koll,obj}} \in [0,1]$ normiert, der der Kollisionsgefahr des Folgefahrzeugs mit dem Egofahrzeug entspricht:

$$p_{\text{koll,obj}} = \frac{a_{\text{x,obj,soll}}}{a_{\text{min}}} . \quad (3.29)$$

War die getroffene Annahme falsch, das heißt es gilt $t_{\text{tc}}^* \leq t_{\text{brems,ego}}$, findet die Berührung bereits statt, bevor das Egofahrzeug seine Sollgeschwindigkeit erreicht hat. Da es zu diesem Zeitpunkt noch mit der maximalen Verzögerung bremst, muss das Folgefahrzeug mindestens ebenso stark bremsen, um die Kollision zu vermeiden. Aus diesem Grund gilt in diesem Fall $p_{\text{koll,obj}} = 1$.

Des Weiteren sind zwei zusätzliche Sonderfälle abzu prüfen:

- Findet zum einen die Kollision bereits vor Ablauf der Reaktionszeit des Folgefahrers statt, also $t_{\text{tc}} < t_{\text{reakt,obj}}$, kann keine notwendige Verzögerung berechnet werden und die Kollisionsgefahr entspricht $p_{\text{koll,obj}} = 1$.
- Erreicht im Gegensatz dazu das Folgefahrzeug während der Reaktionszeit aufgrund der bereits vorhandenen Ausgangsbeschleunigung $a_{\text{x,obj,0}}$ die Sollgeschwindigkeit des Egofahrzeugs, ist keine weitere Verzögerung notwendig und die Kritikalität wird zu $p_{\text{koll,obj}} = 0$.

Analog der Auswahl eines potentiellen Kollisionsobjekts nach vorne mithilfe von $p_{\text{koll,ego}}$, kann durch Vorgabe eines definierten Schwellwerts für $p_{\text{koll,obj}}$ bestimmt werden, ob von einem eventuell vorhandenen Folgefahrzeug ein Risiko im Sinne einer Folgeverkehrskollision ausgeht.

3.2.3 Spurwechsellmöglichkeit

Wesentliches Potential zur Reduzierung des Falschauslöserisikos hat die Bewertung der Spurwechsellmöglichkeit. Steht objektiv kein Platz für das Ausweich- oder Überholmanöver zur Verfügung, kann eine frühzeitig einsetzende Bremsung nicht als subjektiv falsch bewertet werden.

Für die Ermittlung der Spurwechsellmöglichkeit werden bei den bekannten bestehenden Systemen unterschiedliche Herangehensweisen verfolgt. Ameling geht von einem durchführbaren Spurwechsel aus, wenn die Aufprallzeit zu Fahrzeugen auf der Nachbarspur höher ist als die TTC zum potentiellen Kollisionsgegner (vgl. [4]). Mehrere Kriterien zur Beurteilung verwendet Mildner. Hier müssen sowohl ein befahrbarer Fahrstreifen vorhanden sowie die geplante Trajektorie frei sein. Ein Bereich, der von den Sensoren nicht eingesehen werden kann, wird durch den Algorithmus zum Ausweichen gesperrt (vgl. [64]). Die komplexeste Herangehensweise verwendet Nitz, der mithilfe eines probabilistischen Verfahrens die Lücken auf der Nachbarspur bewertet. Im Gegensatz zu den anderen Ansätzen resultiert aus dieser Betrachtung kein binärer, sondern ein kontinuierlicher Wert (vgl. [66]).

In der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz verfolgt, mithilfe der bereits hergeleiteten Bewegungsgleichungen ebenfalls einen kontinuierlichen Wert für die Gefahr eines Spurwechsels zu ermitteln und den zusätzlichen Rechenaufwand für die Ermittlung der Spurwechselfähigkeit dadurch zu minimieren.

Kenngrößen

Die aus der Spurzuordnung für die Nebenspurobjekte bekannte Aufteilung vor, neben und hinter dem Egofahrzeug jeweils links und rechts wird als Grundlage zur Ermittlung der Spurwechselfähigkeit genutzt. Für die jeweiligen Bereiche werden Kenngrößen definiert, die mit der Durchführbarkeit des Spurwechsels skalieren.

Ist die Nachbarspur vor dem Egofahrzeug durch einen anderen, langsamer fahrenden Verkehrsteilnehmer belegt, muss das Egofahrzeug zum Spurwechsel eine Verzögerung aufbringen, um dieselbe Geschwindigkeit wie das Fremdfahrzeug zu erreichen. Eine analoge Betrachtung lässt sich für den Bereich hinter dem Egofahrzeug anstellen. Nähert sich ein Fremdfahrzeug mit höherer Geschwindigkeit auf der Nachbarspur an, muss es im Fall eines Spurwechsels des eigenen Fahrzeugs ebenfalls bremsen, um eine Kollision zu vermeiden. Als relevante Kenngrößen für die Bereiche vor und hinter dem Egofahrzeug werden daher jeweils die notwendigen Verzögerungen $a_{x,soll}$ herangezogen. Ihre Berechnung ergibt sich aus der bekannten Forderung analog Gleichung (3.12), dass die Relativgeschwindigkeit vollständig abgebaut wird, und unter Annahme zeitlich stationärer Beschleunigungen im Frontbereich zu

$$a_{x,ego,soll} = -\frac{v_{x,rel,0}^2}{2 \cdot d_{x,0}} + a_{x,obj,0} \quad (3.30)$$

und im Heckbereich unter Berücksichtigung der eigenen Fahrzeuglänge l_{ego} zu

$$a_{x,obj,soll} = \frac{v_{x,rel,0}^2}{2 \cdot (d_{x,0} + l_{ego})} + a_{x,ego,0} \quad (3.31)$$

Für den Bereich direkt neben dem Egofahrzeug kann keine notwendige Verzögerung berechnet werden. Hier ist vielmehr relevant, wie viel Abstand zur Seite für das Spurwechselmanöver benötigt wird. Als Kenngröße ergibt sich daher $b_{y,ausw}$ analog der Berechnung in Abschnitt 3.2.1 aus den Objektbreiten sowie einem bestehenden Querversatz zum vorausfahrenden Fahrzeug (siehe Gleichung (3.19)).

Die Normierung der errechneten Kenngrößen mit ihren Vergleichsgrößen führt schließlich im jeweiligen Bereich i zur Kollisionsgefahr beim Ausweichen beziehungsweise Spurwechsel $p_{koll,ausw,i} \in [0,1]$. Ein vollständig gefahrlos durchführbarer Spurwechsel entspricht dabei $p_{koll,ausw} = 0$. Als Vergleichsgrößen werden für den Front- und Heckbereich eine maximal zumutbare Verzögerung $a_{x,min}$ und für den Seitenbereich der zur Verfügung stehende Platz $|d_y| - 1/2 \cdot (b_{ego} + b_{obj})$ herangezogen. Das Maximum der drei Faktoren bestimmt dann die gesamthafte Kollisionsgefahr. Wird ein definierter Schwellwert für das Maximum unterschritten, wird von der Durchführbarkeit des Spurwechsels in die entsprechende Richtung

ausgegangen:

$$p_{\text{koll,ausw}} = \max \left(\underbrace{\left(\frac{a_{x,\text{ego,soll}}}{a_{x,\text{ego,min}}} \right)}_{\text{Frontbereich}}, \underbrace{\left(\frac{a_{x,\text{obj,soll}}}{a_{x,\text{obj,min}}} \right)}_{\text{Heckbereich}}, \underbrace{\left(\frac{b_{y,\text{ausw}}}{|d_y| - \frac{1}{2} \cdot (b_{\text{ego}} + b_{\text{obj}})} \right)}_{\text{Seitenbereich}} \right) . \quad (3.32)$$

Prädiktion

Der im vorangegangenen Abschnitt berechnete Wert bildet die zum aktuellen Zeitpunkt bestehende Spurwechsellmöglichkeit $p_{\text{koll,ausw}}(t_0)$ ab. Diese statische Betrachtung reicht jedoch zur vollständigen Situationsbeurteilung nicht aus. Da nicht bekannt ist, wann der Fahrer des Egofahrzeugs während des Annäherungsprozesses an ein vorausfahrendes Fahrzeug, das einen potentiellen Kollisionsgegner darstellt, den Spurwechsel durchführen möchte, muss die Spurwechsellmöglichkeit in die Zukunft präzidiert werden. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 3.5: Während das Nachbarspurobjekt zum momentanen Zeitpunkt noch eine Kollisionsgefahr beim Spurwechsel darstellt, kann das Ausweich- oder Überholmanöver später ungestört durchgeführt werden.

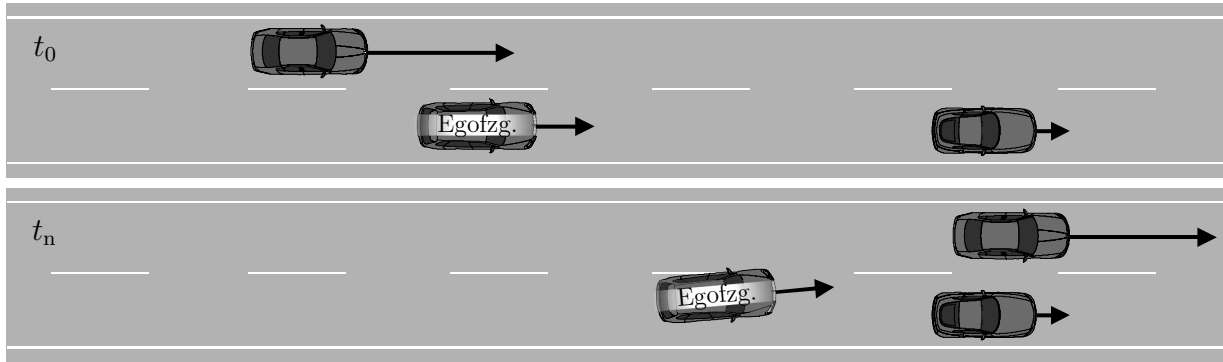


Abbildung 3.5: Notwendigkeit der Prädiktion der Spurwechsellmöglichkeit aufgrund sich verändernder Situation bis zum potentiellen Eingriffszeitpunkt

Die verbleibende Zeit bis zum letztmöglichen Ausweichzeitpunkt wird daher in n diskrete Zeitschritte geteilt, für die jeweils die vorliegende Kollisionsgefahr beim Spurwechsel errechnet wird. Die präzidierten Werte für Abstand und Relativgeschwindigkeit zur Berechnung der notwendigen Verzögerungen im Front- und Heckbereich ergeben sich dabei anhand der Bewegungsgleichungen (3.1) und (3.2). Im Seitenbereich wird davon ausgegangen, dass sich das Fremdfahrzeug lediglich in Längsrichtung bewegt und der seitliche Abstand konstant bleibt. Dabei ist es jedoch möglich, dass sich das Fremdfahrzeug durch die relative Bewegung aus dem Seitenbereich des Egofahrzeugs herausbewegt.

Unter der Prämisse, dass der Fahrer zeitlich den ungefährlichsten Spurwechsel wählt, entspricht die aus der Prädiktion resultierende Kollisionsgefahr schließlich dem minimal auftretenden Wert:

$$p_{\text{koll,ausw}} = \min (p_{\text{koll,ausw}}(t_0), \dots, p_{\text{koll,ausw}}(t_n)) . \quad (3.33)$$

3.3 Menschliche Rahmenbedingungen

Die zusätzliche Berücksichtigung menschlicher Kenngrößen kann die Qualität der Situationsbewertung deutlich erhöhen. Vorrangig wird dazu die Reaktion des Fahrers ausgewertet, die dank messbarer Größen wie der Pedal- oder Lenkradbetätigung in modernen Fahrzeugen einfach ermittelbar ist. Diese Reaktion stellt jedoch das letzte Glied in der chronologischen Abfolge dar, die mit einem reaktionsauslösenden Ereignis beginnt und in eine variable Fahrerreaktionszeit übergeht. In diesem Abschnitt soll daher auch für diese nicht messbaren Größen ein Modell geschaffen werden, das ihre Verwendung in der Algorithmen erlaubt. Ziel ist dabei nicht eine fahrerindividuelle Modellierung, sondern eine Maximalbetrachtung, die für einen definierten und parametrierbaren Anteil aller Fahrer Gültigkeit besitzt.

3.3.1 Reaktionsbedarf

Eine messbare Fahrerinteraktion beispielsweise am Lenkrad oder am Bremspedal stellt meist eine Reaktion auf einen definierten Auslöser dar. Im alltäglichen Straßenverkehr ist der Fahrer ständig mit solchen Ereignissen konfrontiert, auf die er zur Vermeidung einer Kollision reagieren muss. Dazu zählen auch die wesentlichen Anwendungsfälle für die Auslösung einer autonomen Gefahrenbremsung (vgl. [48]):

- Eine kontinuierliche Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug,
- ein plötzliches Bremsmanöver eines vorausfahrenden Fahrzeugs sowie
- ein in die eigene Spur einscherendes Nachbarfahrzeug.

Obwohl keine Informationen zum subjektiven Fahrerempfinden vorliegen, kann mithilfe der zur Verfügung stehenden Daten ein Modell dieser Reaktionsauslöser beziehungsweise Ereignisse geschaffen werden. Dazu werden fahrpsychologische Schwellwerte verwendet, die den Übergang von einer als sicher empfundenen Fahrt hin zu einer reaktionsbedürftigen Situation beschreiben. Für die genannten Anwendungsfälle werden diese im Folgenden ausführlich erläutert.

Kontinuierliche Annäherung

Im Fall der kontinuierlichen Annäherung nimmt der Abstand zwischen Egofahrzeug und einem vorausfahrenden Fahrzeug lediglich aufgrund einer bestehenden Relativgeschwindigkeit und ohne (hohe) Relativbeschleunigung stetig ab. Denkbar ist diese Konstellation beispielsweise in Ablenkungssituationen, in denen der Fahrer seine Aufmerksamkeit nicht auf das Verkehrsgeschehen richtet, oder bei Stauende-Szenarien. Mit dem abnehmenden Abstand steigt gleichzeitig die Gefahr der Situation kontinuierlich an. Die Festlegung einer definierten Grenze, ab wann der Fahrer den Annäherungsprozess als gefährlich empfindet und ihn zum Anlass einer Reaktion nimmt, ist hierbei jedoch schwierig.

Wie in Abschnitt 3.1.2 erläutert, eignen sich zeitbasierte Größen und hierbei vor allem die TTC zur geschwindigkeitsunabhängigen Beschreibung einer Annäherungssituation. Es liegt daher nahe, zur Definition des Reaktionsstartpunkts eine TTC-Schwelle zu wählen, unterhalb derer der Fahrer einen akuten Handlungsbedarf empfindet, die Lücke zwischen Ego- und Fremdfahrzeug wieder zu vergrößern oder dem Hindernis durch ein Überholmanöver auszuweichen (vgl. [48]). Im Rahmen der Untersuchung von Spurwechselmanövern wurde diese Grenze – auch als „unterer Folgeabstand“ bezeichnet – bei $t_{tc} = 5,0\text{ s}$ festgestellt (vgl. [21]).

Mit dem Unterschreiten des Schwellwerts wird das Ereignis „kontinuierliche Annäherung“ und damit der Beginn der darauf folgenden Reaktionszeit und Reaktion getriggert. Sollte aufgrund von Sichtbehinderungen das auslösende Hindernis erst später wahrnehmbar sein, gilt der Erkennungszeitpunkt als Reaktionsauslöser.

Plötzlich bremsendes Vorderfahrzeug

Als wesentlicher Anwendungsfall für einen aktiven Bremseneingriff gilt ein überraschend bremsendes Vorderfahrzeug, das den Fahrer des Egofahrzeugs sprunghaft in eine kritische Situation versetzt. Ausgangsbasis vor dem plötzlichen Bremsen des Fremdfahrzeugs ist eine Fahrt im Folgeverkehr, bei der die Verkehrsteilnehmer einander in definiertem Abstand mit annähernd gleicher Ausgangsgeschwindigkeit $v_{x,\text{folg},0} = v_{x,\text{ego},0} \approx v_{x,\text{obj},0}$ folgen.

Während der Annäherungsprozess im vorangegangenen Abschnitt gut mithilfe der TTC darstellbar ist, wird eine Folgefahrt, bei der im Ausgangsstadium $t_{tc} = \infty$ gilt, mittels Abstandswerten beschrieben. Dabei sind für den minimalen Folgeabstand die Richtlinien „halber Tacho“ – also die Hälfte der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit in km/h als Abstand in m – und „Zwei Sekunden“ – also das Erreichen der aktuellen Position des Vorderfahrzeugs in zwei Sekunden – bekannt. Aus Messungen geht jedoch hervor, dass sich die gefahrenen Abstände nicht direkt proportional zur Geschwindigkeit verhalten, sondern bei höheren Geschwindigkeiten wesentlich niedrigere Folgeabstände vom Fahrer als ausreichend akzeptiert werden (vgl. [94]). Wiedemann modelliert auf Basis der Daten einen parabolischen, normalverteilten Zusammenhang, der maximal

$$d_{x,\text{folg},\min} = \underbrace{d_{x,\min}}_{\substack{\text{Sicherheitsabstand} \\ \text{im Stillstand}}} + 8 \cdot \sqrt{v_{x,\text{folg},0}} \quad (3.34)$$

entspricht (vgl. [94]). Es zeigt sich, dass diese Modellierung im Vergleich zu den bisher bekannten Richtlinien im niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu höheren Abständen führt – umgekehrt im höheren Geschwindigkeitsbereich (siehe Abbildung 3.6).

Mithilfe des definierten minimalen Folgeabstands und des minimalen Abstands im Stillstand ($d_{x,\min} \approx 1\text{ m}$) kann nun die Wunschverzögerung $a_{x,\text{ego},\text{soll}}$ für das Egofahrzeug im Fall einer plötzlichen Vollverzögerung des Vorderfahrzeugs berechnet werden (vgl. [94]):

$$a_{x,\text{ego},\text{soll}} = \frac{v_{x,\text{rel},0}^2}{2 \cdot (d_{x,\min} - d_{x,0})} + a_{x,\text{obj},0} - g \cdot \frac{d_{x,\text{folg},\min} - d_{x,0}}{d_{x,\text{folg},\min} - d_{x,\min}}, \quad (3.35)$$

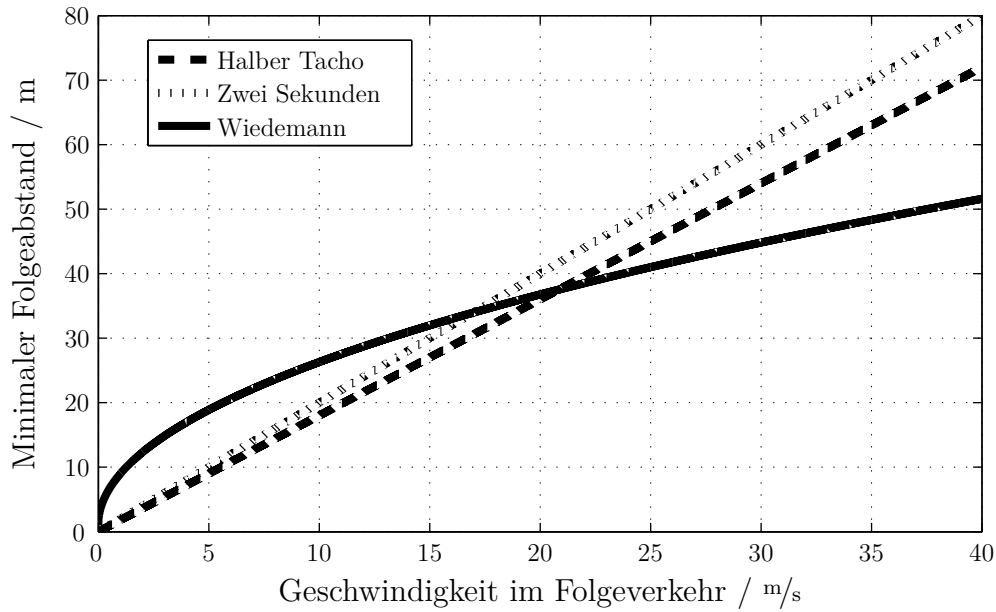


Abbildung 3.6: Minimale Folgeabstände nach unterschiedlichen Richtlinien (vgl. [94])

wobei der erste Teil des Terms Gleichung (3.30) entspricht und der zweite Teil die Verzögerung unterhalb des minimalen Folgeabstands noch verstärkt.

Das reaktionsauslösende Ereignis einer plötzlichen Bremsung des Vorderfahrzeugs wird schließlich getriggert, wenn die errechnete Sollbeschleunigung kleiner ist als die momentane Eigenfahrzeugbeschleunigung $a_{x,ego,0}$.

Plötzlich einscherendes Nachbarfahrzeug

Als dritter Anwendungsfall wird ein vor dem eigenen Fahrzeug einscherendes Nachbarfahrzeug betrachtet. Gemäß den Überlegungen im vorangegangenen Abschnitt ist dieses Einscheren nur dann ein potentieller Reaktionsauslöser, wenn es unterhalb des minimalen Folgeabstands $d_{x,folg,min}$ erfolgt. Neben der Situationsanalyse in Längsrichtung ist in diesem Fall aber besonders die Querbewegung des Nachbarfahrzeugs zu bewerten. Als robustes Erkennungsmerkmal für ein Einschermanöver eines Fahrzeugs in die eigene Spur eignet sich die Gegenüberstellung der gefahrenen Trajektorie des Fremdfahrzeugs mit einer oder mehrerer angenommenen Modelltrajektorien (vgl. [18]).

Als Modellannahme dient in vorliegender Arbeit ein Spurwechsel entlang einer Sinuskurve, die durch eine angenommene Spurbreite b_{spur} sowie eine angenommene maximale Dauer des gesamten Spurwechsels t_{sw} vollständig bestimmt ist (vgl. [92]):

$$s_y(t) = \pm \frac{b_{spur}}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_{sw}} \cdot t\right) \right). \quad (3.36)$$

Die quadrierte Abweichung der tatsächlich gefahrenen Kurve von der Modelltrajektorie – also das Fehlerquadrat – ermöglicht durch Festlegen eines definierten Schwellwerts die Erkennung des Einschermanövers. Kombiniert mit dem Unterschreiten des Folgeabstands

in Längsrichtung triggern die beiden Merkmale das Ereignis eines plötzlich einscherenden Nachbarfahrzeugs und damit den angenommenen Beginn von Reaktionszeit und Reaktion.

3.3.2 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit des Fahrers, also die Dauer, die nach dem Auftreten des entsprechenden Reaktionsauslösers einsetzt und bis zu dem Zeitpunkt reicht, zu dem die Fahrerreaktion gemessen werden kann, ist eine wesentliche Kenngröße für die Algorithmik eines Gefahrenbremssystems. Steht eine statistische Annahme über das Reaktionsvermögen des Fahrers zur Verfügung, kann die Auslösung von Warnung und Bremsung angepasst an die jeweilige Situation erfolgen.

Grundlage für die Modellierung der Fahrerreaktionszeit ist der so genannte OODA-Wirkkreis. Dieser repräsentiert die einzelnen Komponenten der menschlichen Entscheidungsfindung: O(bserve, Beobachten), O(rient, Einordnen), D(ecide, Entscheiden) und A(ct, Handeln) (vgl. [87]). Während der OODA-Wirkkreis seinen Ursprung in der Auswertung von Luftkämpfen hat, lässt er sich ebenso gut auf Bremssituationen im täglichen Straßenverkehr anwenden, in denen ein Handlungsbedarf erkannt und entsprechend agiert wird.

Die erste Phase des Beobachtens beschreibt die rein visuelle Wahrnehmung der Situation, beispielsweise die aufleuchtenden Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs. Erst mit der zweiten Phase des Einordnens wird die Situation als Bremsung klassifiziert. In sie fließt das menschliche Vorwissen ein, das erlernt oder durch Vorerfahrungen geprägt sein kann. Weiterhin kann diese Phase auch eine kurzfristige Prognose über die Gefährlichkeit der Situation beinhalten (vgl. [48]). Während der Entscheidungsfindung nutzt der Fahrer die ihm zur Verfügung stehenden Informationen, um eine angemessene Reaktion auf die gegebene Situation abzuleiten, die in der vierten Phase schließlich ausgeführt wird. Im dargestellten Beispiel entspricht dies einem Bremsen auf das vorausfahrende Fahrzeug.

Sowohl der Beobachtungs- als auch der Handlungsprozess sind im Durchschnitt aller Fahrer annähernd gleich lang. Die Dauer für die reine Wahrnehmung der Situation liegt bei circa 0,3s, die Ausführung der Handlung – also die Fußbewegung bis zur Pedalbetätigung – aufgrund der häufigen Übung bei circa 0,2s (vgl. [16, 81]). Im Gegensatz dazu sind die verbleibenden Prozessschritte abhängig vom auslösenden Ereignis. Unerwartete Auslöser, beispielsweise eine unvorhersehbare starke Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs, oder Ereignisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit führen zu einer längeren Phase des Einordnens und der Entscheidungsfindung als erwartete oder häufig auftretende. Zusammen lassen sich diese beiden Prozessschritte als gammaverteilt modellieren, wodurch vor allem die Häufigkeit überdurchschnittlich langer Reaktionszeiten berücksichtigt wird. Weitere Einflussfaktoren wie Fahrererfahrung oder Müdigkeit sind somit in der Wahrscheinlichkeitsverteilung enthalten (vgl. [48]):

$$t_{\text{ooda}} = \underbrace{t_{\text{observe}} + t_{\text{act}}}_{\approx 0,5 \text{ s}} + \underbrace{t_{\text{orient}} + t_{\text{decide}}}_{\text{gammaverteilt}} . \quad (3.37)$$

Für die Dichtefunktion der Gammaverteilung gilt

$$\gamma_{\alpha,r}(t_{\text{ooda}}) = \frac{\alpha^r}{\Gamma(r)} \cdot t_{\text{ooda}}^{r-1} \cdot \exp(-\alpha \cdot t_{\text{ooda}}) \quad (3.38)$$

mit den Parametern α und r sowie der Euler'schen Gammafunktion

$$\Gamma(r) = \int_0^\infty x^{r-1} \cdot \exp(-x) \, dx \quad (3.39)$$

(vgl. [31]). Um nun zu einer spezifischen Reaktionszeiten-Gammaverteilung zu gelangen, müssen die Unbekannten α und r anhand der Ergebnisse vorhandener Studien zu Bremsreaktionszeiten vor allem aus den Werten für Median und 95. Perzentil sowie über den Zusammenhang für die Standardabweichung der Gammaverteilung

$$\sigma(x) = \frac{\sqrt{r}}{\alpha} \quad (3.40)$$

ermittelt werden (vgl. [48]).

Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Reaktionszeitenstudien bietet Green. Als wesentliches Differenzierungsmerkmal stellt dieser – wie oben bereits angesprochen – die Erwartungshaltung der Fahrer gegenüber der drohenden kritischen Situation fest (vgl. [33]). Unterschieden wird dabei zwischen erwarteten, unerwarteten und völlig überraschenden Reaktionsauslösern, wobei letztere aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit nicht verwendet werden. Für die beiden ersten Kategorien wird jeweils das repräsentative Ergebnis übernommen und dient der Ermittlung der Parameter α und r zur Anpassung der Studie an die Gammaverteilung. Den verwendeten Untersuchungen ist gemein, dass die Auslösung der Reaktionszeit auf ein bremsendes Vorderfahrzeug erfolgt und damit der visuelle Sinneskanal die erkannten Informationen verarbeiten muss.

Zur Ermittlung einer resultierenden Reaktionszeit reicht die Dichtefunktion $\gamma_{\alpha,r}(x)$ jedoch nicht aus. Vielmehr soll das Risiko parametrierbar sein, eine angenommene Dauer zu überschreiten. Um dieses zu berechnen, wird die kumulierte Gammaverteilung, die sich über das Integral der Dichtefunktion ergibt, von eins abgezogen (vgl. [48]). Ein Risiko von 40% bedeutet beispielhaft, dass in der betrachteten Untersuchung 60% der Fahrer weniger oder genau die resultierende Zeit zur Reaktion auf das auslösende Ereignis benötigten. Dies entspricht wiederum der angestrebten Maximalbetrachtung für einen definierten Prozentsatz aller Fahrer. Abbildung 3.7 zeigt die verwendeten Risikofunktionen für erwartete und unerwartete Ereignisse aus den Untersuchungen von Green.

Die Komplexität der Fahreraufgabe hängt jedoch nicht nur vom auslösenden Ereignis ab, sondern steigt auch mit der Zahl der zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen n . Für die Reaktion vor einer potentiellen Auffahrkollision entspricht dies der Entscheidung zwischen Bremsen und Ausweichen und führt vor allem in der dritten Phase des OODA-Wirkkreises zu verlängerten Prozesszeiten. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Alternativen und der Reaktionszeit wird von Hick als logarithmisch postuliert (vgl. [36]). Da die einzelnen Eintrittswahrscheinlichkeiten p_i a priori unbekannt sind, werden sie mit

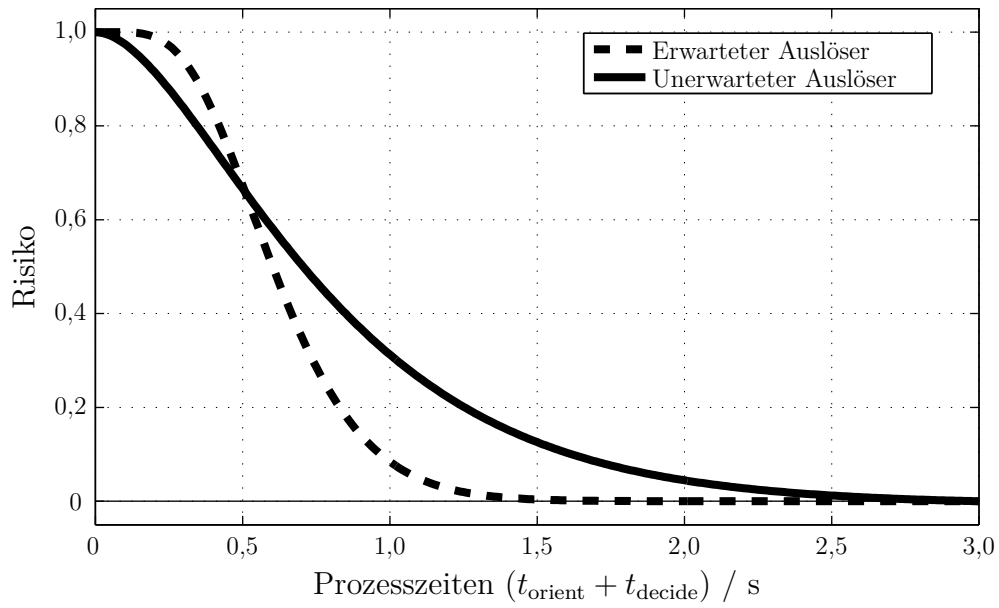


Abbildung 3.7: Risikofunktionen für erwartete und unerwartete Auslöser

gleicher Wahrscheinlichkeit $p_i = 1/n$ angenommen:

$$t_{\text{reakt}} = t_{\text{ooda}} \cdot \sum_{i=1}^n \left[p_i \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p_i} + 1 \right) \right] = t_{\text{ooda}} \cdot \log_2 (n + 1) . \quad (3.41)$$

3.3.3 Reaktion

Die Interaktion des Fahrers mit seiner Umwelt endet nach auslösendem Ereignis und Reaktionszeit mit der tatsächlichen Ausführung einer Aktion. Diese ist mithilfe der zur Verfügung stehenden Daten wie Lenkrad-, Pedal- oder Lenkstockhebelbetätigung einfach erfassbar und wird teilweise bereits in bestehenden Gefahrenbremsalgorithmen verwendet (siehe Abschnitt 2.2). Neben der reinen Messung ist jedoch auch die Bewertung der Reaktion hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit und Qualität notwendig. Sowohl die Erkennung als auch die Beurteilung werden im Folgenden erläutert.

Aktion

Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, eignen sich grundsätzlich sowohl ein Brems- als auch ein Ausweich- oder Überholmanöver zur Vermeidung einer drohenden Auffahrkollision. Für beide Handlungsalternativen lassen sich Indikatoren definieren, mithilfe derer die entsprechende Aktion detektiert werden kann.

Indikatoren für Ausweichen beziehungsweise Überholen

Idealerweise kündigt der Fahrer des Egofahrzeugs seinen Wunsch zum Spurwechsel durch Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers an. In diesem Fall kann von einem aufmerksamen Fahrer ausgegangen werden, der die potentielle Kollisionsgefahr auf seiner Spur frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet hat. Die Erkennung des Indikators für

Ausweichen ist dabei direkt an den auf dem Fahrzeugbus messbaren Wert der Betätigung gekoppelt.

Mit zunehmender Kritikalität der Situation und gleichzeitig abnehmendem Abstand kann jedoch nicht zwingend von einer Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers ausgegangen werden. Hinzu kommt, dass viele Fahrer beim Spurwechsel vollständig darauf verzichten (vgl. [57]). Daher ist eine Erkennung der Ausweich- oder Überholaktion auch über die vorhandenen Umgebungs- beziehungsweise Objektdaten notwendig.

Intuitiv bietet es sich an, zur Erkennung eines beginnenden Ausweichvorgangs die Veränderung des lateralen Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug zu beobachten. Überschreitet der Gradient einen definierten Schwellwert, kann von einer bewussten Querbewegung ausgegangen werden. Leichte Pendelbewegungen innerhalb der Spur – sowohl vom Ego- als auch vom Vorderfahrzeug – werden hingegen nicht fälschlicherweise als Ausweichen gewertet.

Um den Überholwunsch frühzeitig mit einbeziehen zu können, liegt die Verwendung von Spurwechselmotivationsmodellen oder Absichtsprädiktionen nahe. Diese gehen davon aus, dass ein sich anbahnendes Fahrmanöver aus einer definierten Sequenz von beobachtbaren Verhaltensmustern besteht (vgl. [54]). Werden diese Muster, die sich aus messbaren Einzelwerten zusammensetzen, detektiert, wird auf die baldige Ausführung des Manövers geschlossen. Für ein beabsichtigtes Ausweich- oder Überholmanöver spricht zum einen die Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug sowie zum anderen die Betätigung des Fahrpedals. Durch Kombinieren der TTC mit der aktuellen Fahrpedalstellung lässt sich die Fahrerintention daher in den meisten Fällen zuverlässig erkennen (vgl. [43]).

Indikatoren für Bremsen

Im Vergleich zu den Indikatoren für Ausweichen sind die Indikatoren für eine Bremsreaktion sehr viel einfacher detektierbar. Eine Verzögerung durch Betätigung des Bremspedals lässt sich über den Kontaktschalter zur Aktivierung des Bremslichts erkennen, dessen Wert auf dem Fahrzeugbus verfügbar ist. Neben der Bremsverzögerung kann die Fahrzeuggeschwindigkeit auch durch den Aufbau von Schleppmoment reduziert werden, das bei Loslassen des Fahrpedals und Reduzieren der Drehzahl hin zur Leerlaufdrehzahl entsteht. Ein betragsmäßig großer, negativer Gradient der Fahrpedalposition dient dabei der Erkennung des Fahrpedal-Loslassens.

Aktionsbewertung

Die Ausführung der Handlung beinhaltet keine Aussage darüber, ob die gewählte Handlungsalternative auch durchführbar beziehungsweise ausreichend ist. Eine Bewertung dahingehend ist jedoch erforderlich, um die erkannten Interaktionen in der Algorithmik verwenden zu können.

Eine adäquate und rechtzeitige Bremsreaktion liegt vor, wenn die durch den Fahrer aufgebrachte Verzögerung im Betrag größer ist als die zur Vermeidung der Kollision notwendige Verzögerung. Diese errechnet sich analog Gleichung (3.30) unter Annahme zeitlich stationärer Beschleunigungen von Egofahrzeug und potentielltem Kollisionsobjekt.

Zur Bewertung der Indikatoren für Ausweichen kann die in Abschnitt 3.2.3 ermittelte

Spurwechsellmöglichkeit herangezogen werden. Ein durchführbares Ausweich- oder Überholmanöver liegt vor, wenn die entsprechende Richtung zum Spurwechsel nicht durch andere Objekte belegt ist. Während bei der Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers sowie beim abnehmenden Querabstand die Ermittlung der Spurwechselrichtung implizit aus der Kenngröße möglich ist, wird beim Spurwechselmotivationsmodell davon ausgegangen, dass der Fahrer das Manöver in die ungefährlichere der beiden Richtungen durchführt.

Die Kombination von Aktion und Aktionsbewertung führt schließlich zu einer robusten Erkennung der Fahrerreaktion, die als Antwort auf Auslöser und nach Ablauf der Reaktionszeit zu erwarten ist. Die kombinierte Größe wird dem Algorithmus im folgenden Kapitel zur Verfügung gestellt.

3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Die vorgestellten Kenngrößen bilden die Grundlage, um die Gesamtstrategie des Gefahrenbremsystems adaptiv an die Situation anpassen zu können und die adressierten Risiken zu reduzieren. Bereits aus bestehenden Ansätzen bekannt sind dabei die letztmöglichen Zeitpunkte für kollisionsvermeidendes Bremsen und Ausweichen. Ersterer kann durch eine bessere Berücksichtigung der bereits vorhandenen Beschleunigung vor der Bremsung in seiner Genauigkeit noch verbessert werden. Bei der Umsetzung des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts liegt der Fokus vor allem in der seriennahen Modellierung, die sich durch einen ausgewogenen Kompromiss aus einfacher Berechnung und ausreichender Genauigkeit auszeichnet.

Neuartige Faktoren zur Umgebungsinterpretation für ein Gefahrenbremsystem stellen die Bewertung eines möglicherweise vorhandenen Folgeverkehrs sowie die prädiizierte Beurteilung der Spurwechsellmöglichkeit dar. Beide skalieren direkt mit den notwendigen Verzögerungen, die die Verkehrsteilnehmer im Falle einer Vollbremsung beziehungsweise eines Spurwechsels des Egofahrzeugs aufbringen müssen. Mithilfe zugrunde gelegter Maximalverzögerungen werden die errechneten Werte dann auf Kenngrößen $\in [0,1]$ normiert.

Zusätzlich stellen die Modellierung und Erfassung menschlicher Aktionen eine wesentliche Erweiterung im Hinblick auf eine situationsoptimale Bremsung dar. Stehen statistische Annahmen über den Großteil aller Fahrer zur Verfügung, kann vor allem das Falschauslöserisiko erheblich reduziert werden. Die Verknüpfung physikalischer und menschlicher Rahmenbedingungen erfolgt im Rahmen der Auslegung der Eingriffsstrategie im folgenden Kapitel.

Entwurf einer risikoadaptiven Eingriffsstrategie

Löst ein Gefahrenbremssystem seine Warnung und Bremsung lediglich unter Betrachtung des potentiellen Kollisionsobjekts vor dem eigenen Fahrzeug und mit maximaler Bremskraft aus, bleiben die in der vorliegenden Arbeit adressierten Risiken einer Falschwarnung und -bremsung sowie einer Folgekollision unberücksichtigt. Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, sind jedoch gerade diese Risiken zur Maximierung der Gesamtwirksamkeit des Systems und zum Erreichen einer hohen Kundenakzeptanz zu reduzieren. In diesem Kapitel soll daher eine Eingriffsstrategie erarbeitet werden, die sich situationsadaptiv den gegebenen Umständen anpasst und die Auslösung des Gefahrenbremssystems risikoadaptiv gestaltet. Vor allem für die Bestimmung des Bremszeitpunkts sowie der Bremsstärke werden dazu die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Kenngrößen verwendet. Für die Entwicklung der risikoadaptiven Vorwarnung wird ein neuartiger Ansatz verfolgt, der die Nachteile der bisherigen Konzepte beseitigen soll. Abschließend werden die Einzelkomponenten in das in dieser Arbeit vorgestellte Gesamtsystem eingebettet und seine Wirksamkeit diskutiert.

4.1 Schaltruck als Fahrerwarnelement

Die Betrachtung der bestehenden Warnelemente in Abschnitt 2.3 zeigt, dass mit zunehmender Wirksamkeit einer Vorwarnungsvariante ihre Verzeihlichkeit im Falle einer Falschwarnung erheblich abnimmt. Dies führt dazu, dass vor allem die wirksamen Warnungen erst ausgegeben werden, wenn die Situation bereits sehr kritisch ist. Für eine frühe Warnung, wie sie bei Kollisionsvermeidungssystemen notwendig wird, sind die bekannten Vorwarnungen daher eher ungeeignet. Bei der Entwicklung eines neuartigen Warnelements müssen demnach neben den abgelenkten Fahrern auch diejenigen mit berücksichtigt werden, die im Falle eines geplanten Überholmanövers durch die frühzeitige Auslösung ebenfalls in Berührung mit der Warnung kommen. Wünschenswert wäre dabei, dass die erste Gruppe die Warnung als solche wahrnimmt, letztere sie jedoch nicht beziehungsweise nicht in dem

bisherigen Maße als störend empfunden.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Konzept verwendet als Vorwarnung einen in seiner Stärke skalierbaren Schaltruck⁵. Im Automatikgetriebe entsteht dieser beim Wechsel in eine niedrigere Gangstufe durch das Beschleunigen und Verzögern von Trägheitsmassen im Antriebsstrang. Im Beschleunigungsverlauf des Gesamtfahrzeugs ist er in Form einer fallenden und einer überhöht ansteigenden Flanke sichtbar (vgl. Abbildung 4.1). Die gleichermaßen einfache wie vielversprechende Idee des neuartigen Konzepts ist es nun, diesen merklich fühlbaren Ruck als haptisches Warnelement zu nutzen, um die Aufmerksamkeit des abgelenkten Fahrers wieder zu gewinnen. Gleichzeitig profitiert auch der überholende Fahrer von dem Eingriff, der ihm durch die niedrigere Gangstufe ein erhöhtes Drehmomentpotential für seinen Überholvorgang zur Verfügung stellt. Die subjektive Falschwarnung wird damit in eine Unterstützungshandlung transformiert; die Verzeihlichkeit ist entsprechend hoch, da sich der Schaltvorgang in jede der beiden Fahrsituationen einfügt.

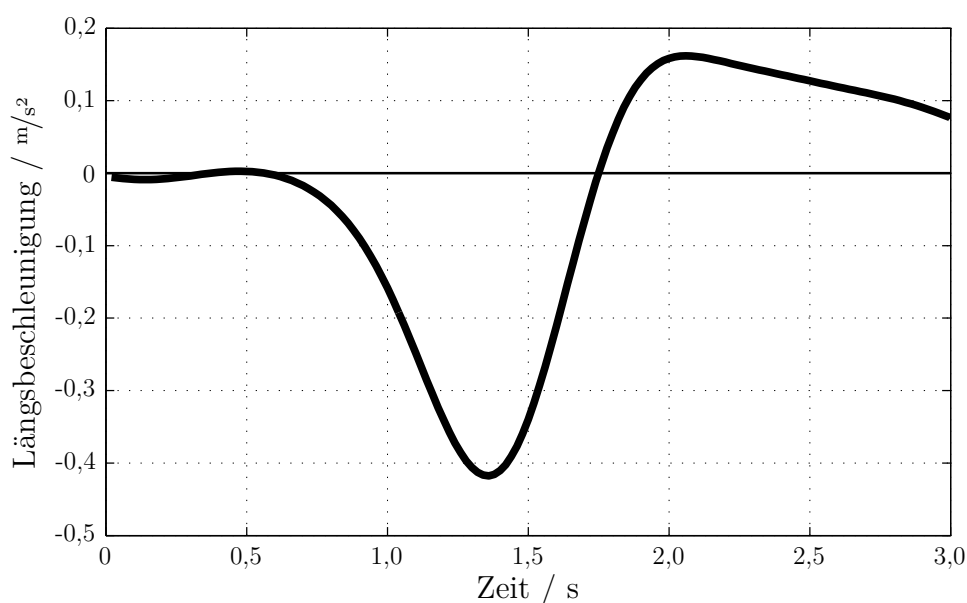


Abbildung 4.1: Exemplarischer Verlauf der Längsbeschleunigung während einer Rückschaltung

Da der Schaltruck im Betrag unterschiedlich stark ausfällt, abhängig davon, von welcher Ausgangsdrehzahl und welchem Ausgangsgang die Rückschaltung erfolgt, soll er durch einen synchronen Bremseneingriff überlagert werden. Dieser bildet den originären Verlauf der Rückschaltung nach und verstärkt somit die Amplitude des Schaltrucks. Dadurch wird eine in ihrer Stärke einstellbare Wirkung erzielt, die sich situationsunabhängig gleich anfühlt.

Das gleichzeitige Erreichen ursprünglich gegensätzlicher Ziele hat zur Folge, dass ein Falschwarnschaden bezogen auf das Dilemma abgelenkter/ überholender Fahrer im eigentlichen Sinne nicht mehr existiert und das Falschwarnrisiko somit minimiert ist.

⁵Auch wenn ein Ruck die dritte Ableitung des Wegs nach der Zeit beschreibt, ist im vorliegenden Zusammenhang unter dem Schaltruck der durch die Rückschaltung entstehende Verlauf in der Längsbeschleunigung zu verstehen.

Zusätzlich bietet das vorgestellte Konzept noch eine Reihe weiterer Vorteile: Der durch die Rückschaltung angesprochene kinästhetisch-vestibuläre Sinneskanal, also der Bewegungs- und Gleichgewichtssinn des Fahrers, hat den geringsten Verzug von der Warngabe bis zur menschlichen Wahrnehmung (vgl. [40]). Das bedeutet, dass eine Reaktion auf den Schaltruck schneller ausfällt als auf einen optischen oder akustischen Reiz. Einen zusätzlichen Effekt im Sinne eines ergänzend adressierten Sinneskanals könnte die erhöhte Geräuschkulisse im Fahrzeuginnenraum erzielen, die durch die angestiegene Drehzahl im niedrigeren Gang zustande kommt. Damit wäre implizit ein akustischer Reiz generiert, ohne auf schwer verzeihliche Warntöne zurückgreifen zu müssen. Dieser ist jedoch stark abhängig von Umwelteinflüssen und der Fahrzeugdämmung.

Eine weitere Anforderung an ein Fahrerassistenzsystem stellt die Bedingung dar, den Fahrer bei einem Eingriff nicht gegenüber seinen Passagieren bloßzustellen (vgl. [40]). Dieser könnte als mangelnde Souveränität im Umgang mit dem Fahrzeug und der Sicherheit der Insassen gewertet werden. Auch hier zeigt sich die Stärke des Schaltrucks, der im Vergleich zu einem Warnton oder einem starken Bremsruck wesentlich subtiler wirkt und sich nicht in die Wahrnehmung der Beifahrer drängt.

Als letzter wesentlicher Vorteil lässt sich die Zeit nach der Rückschaltung anführen. Durch den Schaltruck werden dem Fahrer Handlungsempfehlungen in zweifacher Weise gegeben. Er erhält zugleich Signale, die auf Bremsen und Überholen hindeuten. Unabhängig davon, für welche Alternative sich der Fahrer entscheidet, wird das Gefahrenbremssystem durch die Rückschaltung unterstützt: Wählt der Fahrer den Überholvorgang, muss er zur Beibehaltung oder Erhöhung seines aktuellen Geschwindigkeitsniveaus im niedrigeren Gang das Fahrpedal stärker betätigen als in der höheren Gangstufe. Dies erleichtert die in Abschnitt 3.3.3 vorgestellte Erkennung des Überholindikators. Entscheidet er sich hingegen – vielleicht auch unbewusst durch eine ausbleibende Reaktion – für den Bremsvorgang, kann das im niedrigeren Gang aufgebrachte Schleppmoment bereits vor der Gefahrenbremsung Geschwindigkeit aus der Auffahrsituation nehmen.

4.2 Adaption von Eingriffszeitpunkt und -stärke

Während das Falschwarnrisiko durch das vorgestellte Konzept des Schaltrucks bereits weitgehend aufgelöst werden kann, unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt die Vorwarnung ausgegeben wird, ist eine Transformation der tatsächlichen Bremsung in eine Unterstützungshandlung bei Falschauslösung oder für den Folgeverkehr nur schwer denkbar. Zur Reduzierung des Falschauslöse- und des Folgekollisionsrisikos müssen daher die Freiheitsgrade des Bremsingriffs – nämlich der Zeitpunkt sowie der Verlauf der Bremsung – adaptiert werden. Hierfür finden sich die im vorangegangenen Kapitel eingeführten Kenngrößen in der Verknüpfung physikalischer und menschlicher Rahmenbedingungen wieder.

4.2.1 Berücksichtigung der Fahrerreaktion

Im ersten Schritt soll unter Zuhilfenahme der menschlichen Faktoren (Reaktionsbedarf, Reaktionszeit und tatsächliche Reaktion) der Auslösezeitpunkt des Gefahrenbremssystems

so an die gegebene Situation angepasst werden, dass das Risiko einer Falschauslösung reduziert wird. Diese Betrachtung erfolgt zunächst ohne Berücksichtigung eines eventuell vorhandenen Folgeverkehrs, weshalb die Bremsung mit einer konstant maximalen Verzögerung durchgeführt wird. Des Weiteren wird der Fall von niedrigen Differenzgeschwindigkeiten außen vor gelassen, da hier stets der letztmögliche Bremszeitpunkt als Eingriffszeitpunkt verwendet werden kann. Die folgenden Ausführungen beziehen sich demnach auf den Bereich höherer Differenzgeschwindigkeiten, bei denen ein Überholen noch nach Erreichen des letztmöglichen Bremszeitpunkts möglich ist.

Grundlage des Konzepts ist die Hypothese, dass der Reaktionsprozess des Fahrers im Normalfall funktioniert und nach Reaktionsauslöser und -zeit eine auf die Situation angemessene Reaktion erfolgt (vgl. [48]). Als Alternativhypothese kann damit betrachtet werden, dass die Verarbeitung in einem Prozessschritt des OODA-Wirkkreises versagt und der Fahrer nicht zur Kollisionsvermeidung reagiert. In diesem Fall soll der Fahrer durch einen aktiven Eingriff unterstützt werden. Messbar ist dabei lediglich das Ausbleiben des tatsächlichen Handelns, da nicht feststellbar ist, in welchem vorangegangenen Schritt (Beobachten, Einordnen, Entscheiden) die Verarbeitung stoppte.

Es ist daher notwendig, mindestens bis zum Ende der angenommenen Reaktionszeit zu überprüfen, ob die Nullhypothese einer adäquaten Fahrerreaktion zutrifft. Um diesen Endpunkt der Reaktionszeit zu ermitteln, muss die Situation vom Auftreten eines Reaktionsauslösers um die Reaktionszeit in die Zukunft fortgeschrieben werden. Es wird also die Differenz der momentanen TTC zum Ereignis-Zeitpunkt und der angenommenen Reaktionszeit gebildet. Um diese berechnen zu können, müssen den bekannten Reaktionsauslösern zunächst die entsprechenden Reaktionszeiten zugeordnet werden. Diese sind nach Abschnitt 3.3.2 sowohl für erwartete als auch für unerwartete Auslöser bekannt. Eine kontinuierliche Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug wird demnach als erwartetes, eine plötzliche Bremsung sowie ein einscherendes Fahrzeug als unerwartetes Ereignis betrachtet. Es resultiert damit die nach der Reaktionszeit verbleibende Zeit bis zur Kollision, dargestellt durch einen TTC-Schwellwert.

Sollte vor dem Erreichen des ermittelten Endpunkts der Reaktionszeit eine Fahrerreaktion messbar sein und im Sinne der Aktionsbewertung zur selbständigen Kollisionsvermeidung ausreichen, wird der Eingriff an die Unvermeidbarkeitsgrenze der Kollision, also an den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt gelegt. Obwohl dieser dann aufgrund der vorhandenen Fahrerhandlung nie unterschritten werden sollte, kann der Eingriffszeitpunkt dennoch als Rückfallebene aufrecht erhalten bleiben. Mit dieser Methodik wird der Fahrer bei der Durchführung seines Manövers nicht gestört und eine Falschauslösung vermieden.

Den Eingriffszeitpunkt vor der Erkennung beziehungsweise bei ausbleibender Fahrerreaktion jedoch stets mit dem Endpunkt der Reaktionszeit gleichzusetzen, ist nicht zwingend die richtige Entscheidung. Vielmehr resultiert jener durch einen Vergleich des Endpunkts mit den letztmöglichen Zeitpunkten für Bremsen und Ausweichen. Dabei ergeben sich drei mögliche Konstellationen (vgl. Abbildung 4.2):

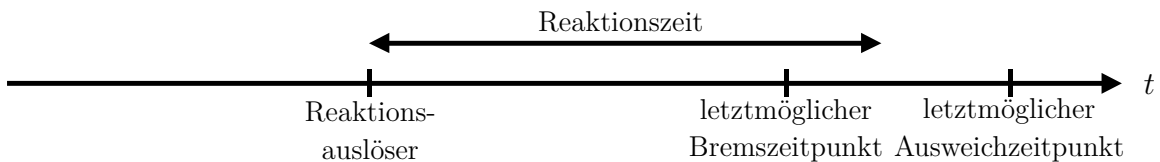
Wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert, ergibt sich die Reaktionszeit für die unterschiedlichen Auslöser durch Vorgabe eines parametrierbaren Prozentsatzes aller Fahrer, für den die resultierende Reaktionszeit den Maximalwert darstellt. Zur Veranschaulichung wird erneut

ein Wert von 60% gewählt. Der erste Fall bedeutet also, dass 60% der Fahrer reagieren, bevor der erste kritische Zeitpunkt – also der letztmögliche Bremszeitpunkt – erreicht ist. Sollte zu diesem Zeitpunkt noch keine Reaktion messbar sein, scheint ein Versagen des Reaktionsprozesses vorzuliegen. Da noch genügend Zeit zur Kollisionsvermeidung durch das Gefahrenbremssystem verbleibt, kann als Eingriffszeitpunkt der letztmögliche Bremszeitpunkt gewählt werden. Da dem Fahrer bereits genügend Zeit eingeräumt wurde, um die Situation selbständig zu entschärfen, ist die Gefahr einer subjektiven Falschauslösung zu diesem Zeitpunkt gering.

Fall 1: t_{reakt} endet vor dem ersten kritischen Zeitpunkt



Fall 2: t_{reakt} endet zwischen den kritischen Zeitpunkten



Fall 3: t_{reakt} endet nach dem letzten kritischen Zeitpunkt

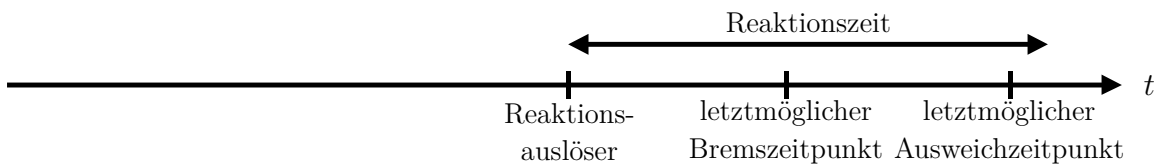


Abbildung 4.2: Fallunterscheidung bei hohen Differenzgeschwindigkeiten

Im zweiten Fall endet die maximale Reaktionszeit von 60% aller Fahrer zwischen den beiden kritischen Zeitpunkten. Hier wird also unter der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit der Nullhypothese sehr viel höher ist als die der Alternativhypothese, zunächst auf einen kollisionsvermeidenden Eingriff verzichtet und der Eingriffszeitpunkt mit dem Ende der Reaktionszeit gleichgesetzt. Dies erhöht das Auffahrerisiko zugunsten des Falschauslöserisikos, was der in Abschnitt 2.4 angesprochenen unterschiedlichen Zielgewichtung entspricht. Teilweise auflösen lässt sich dieser Konflikt durch Heranziehen der Beurteilung der Spurwechselmöglichkeit. Ist ein Ausweichen oder Überholen nicht möglich, wird der letztmögliche Bremszeitpunkt als Eingriffszeitpunkt verwendet; dies gilt auch für alle übrigen Fälle, unabhängig davon, welcher Eingriffszeitpunkt durch die Fallunterscheidung gewählt wird.

Eine Besonderheit der vorgestellten Reaktionszeitenbetrachtung ergibt sich im dritten Fall. Ragt die maximale Reaktionszeit von 60% der Fahrer knapp über den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt hinaus, würde dies bedeuten, dass diese Fahrer spät, aber noch rechtzeitig zur Kollisionsvermeidung reagieren. Richtig ist an dieser Stelle also die Umkehr der prozentualen Betrachtung: Unterschreitet die maximale Reaktionszeit der schnellsten 40% den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt, schaffen die verbleibenden 60% keine rechtzeitige Re-

aktion. In diesem Fall kann der Eingriffszeitpunkt mit dem letztmöglichen Bremszeitpunkt gleichgesetzt werden. Mithilfe des Gefahrenbremssystems ist somit eine Kollisionsvermeidung noch möglich, die der Fahrer selbst nicht mehr geschafft hätte. Eine Falschauslösung ist damit weitgehend ausgeschlossen.

4.2.2 Berücksichtigung des Folgeverkehrs

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, erfolgt die Gefahrenbremsung ohne Folgefahrzeug mit maximaler Verzögerung. Dies gewährleistet, dass ein kollisionsvermeidender Eingriff zum physikalisch letztmöglichen Zeitpunkt durchgeführt werden kann. Ergibt die Bewertung eines möglicherweise vorhandenen Folgefahrzeugs gemäß Abschnitt 3.2.2 eine erhöhte Folgekollisionsgefahr, muss dieser Tatsache in der Ausprägung des Bremsverlaufs Rechnung getragen werden. Da als Prämisse die eigene Kollisionsvermeidung nach vorne bestehen bleibt, hat dies ebenfalls Auswirkungen auf den Zeitpunkt der Bremsauslösung.

Die naheliegende Herangehensweise ist, die Bremsung eher und dafür mit verminderter Verzögerung durchzuführen. Dieser Ansatz wird auch von Kolbe et al. verfolgt (vgl. [52]). Die reduzierte Bremsstärke wird dabei aus einer Gegenüberstellung der Bremszeitreserven nach vorne sowie nach hinten berechnet. Es resultiert die Verzögerung, die in beide Richtungen die meiste Zeit zur Verfügung stellt. Diese wird schließlich konstant gehalten und die Bremsung initiiert.

Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, ist für eine Reduzierung des Folgekollisionsrisikos jedoch vor allem von Interesse, dass der Folgefahrzeugfahrer schnell und möglichst adäquat auf die Notbremsung des Egofahrzeugs reagiert. In der vorliegenden Arbeit wird daher die Bremsung um die bereits eingeführte angenommene Fahrerreaktionszeit ebenfalls früher initiiert. Die gewonnene Zeit wird jedoch nicht mit einer konstant schwächeren Bremsung befüllt, sondern erstmals mit einem gestuften, degressiven Verlauf. Ein degressives Bremsprofil bedeutet, dass zunächst für eine kurze Zeitdauer $t_{\text{deg},1} \approx 0,2\text{s}$ mit einer betragsmäßig hohen Verzögerung $a_{\text{deg},1}$ gebremst und die Verzögerung im Anschluss auf einen stark verminderten Wert $a_{\text{deg},2}$ reduziert wird (siehe Abbildung 4.3).

Die neuartige Idee der degressiven Bremsung ist, den Folgefahrer während des ersten, starken Bremssteils auf die Dringlichkeit seiner eigenen Bremsung aufmerksam zu machen. Dadurch soll erreicht werden, dass er – im Vergleich zu einer konstanten Bremsung des Egofahrzeugs – schneller und stärker verzögert. Im zweiten Teil des Bremsverlaufs wird ihm die Möglichkeit gegeben, durch die dann geringe Verzögerung des Eigenfahrzeugs die drohende Folgeverkehrskollision zu vermeiden – die Folgekollisionsrate wird damit reduziert.

Bei der Applikation des Bremsverlaufs muss eine wesentliche Randbedingung berücksichtigt werden: Der erste Teil des Bremsprofils darf aufgrund seiner starken Ausprägung nicht zu einer Kollision führen, was den gewünschten Effekt völlig zunichtemachen würde. Dies ist besonders kritisch, weil sich der Folgefahrer zu diesem Zeitpunkt noch innerhalb seiner Reaktionszeit befindet. Erreicht wird dies durch die Vorgabe einer minimalen TTC, die während des ersten Teils des Bremsprofils nicht unterschritten werden darf. In der vorliegenden Arbeit wird dafür ein Wert von $t_{\text{tc},\text{min}}^* = 1,5\text{s}$ verwendet, der in Näherung den Übergang hin zu einer kritischen Situation beschreibt (vgl. [65]).

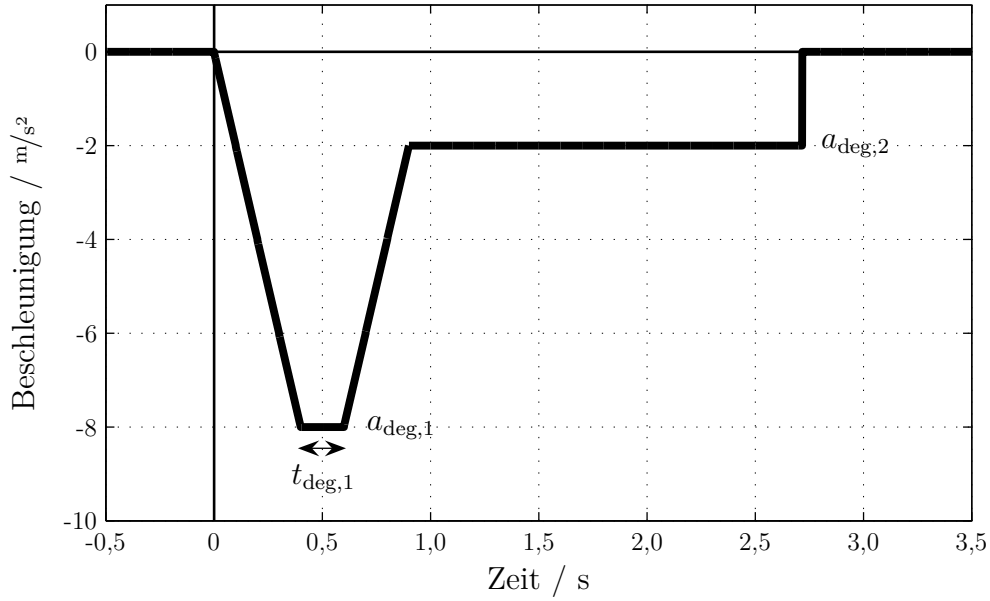


Abbildung 4.3: Degressiver Bremsverlauf bei kritischem Folgefahrzeug

Unter Vernachlässigung des zweiten Teils des Bremsprofils und bei der näherungsweisen Verwendung der in Abschnitt 3.2.1 eingeführten Schwellzeit t_s für die Zeit des Auf- sowie des Abbauens der Verzögerung, resultiert für die Dauer der Bremsung mit $a_{\text{deg},1}$

$$t_{\text{brems,ego}} = t_{\text{deg},1} + t_s \quad (4.1)$$

und für das Bremsverhalten während dieser Zeit

$$a_{x,\text{ego}}(t) = \begin{cases} a_{\text{deg},1} & \text{für } t \leq t_{\text{brems,ego}} \\ 0 & \text{für } t > t_{\text{brems,ego}} \end{cases} \quad (4.2)$$

Für den Folgefahrer wird angenommen, dass er sich – wie oben bereits erwähnt – innerhalb seiner Reaktionszeit befindet und daher noch keine Verzögerung zeigt. Da die minimale TTC explizit vorgegeben wird, lässt sich damit unter der Bedingung $t_{\text{tc,min}}^* > t_{\text{brems,ego}}$ durch Auflösen von Gleichung (3.27) die Verzögerung für den ersten Teil des degressiven Bremsprofils $a_{\text{deg},1}$ berechnen:

$$a_{\text{deg},1} = \frac{d_{x,0} + l_{\text{ego}} + v_{x,\text{rel},0} \cdot t_{\text{tc,min}}^*}{\frac{1}{2} \cdot t_{\text{brems,ego}}^2 + t_{\text{brems,ego}} \cdot (t_{\text{tc,min}}^* - t_{\text{brems,ego}})} \in [-8 \text{ m/s}^2, -4 \text{ m/s}^2] \quad (4.3)$$

Für die Bremsstärke in der zweiten Stufe des Verzögerungsprofils wird ein konstanter Wert $a_{\text{deg},2} = -2,0 \text{ m/s}^2$ verwendet, der für den Folgeverkehr unkritisch ist. Die theoretische Dauer der zweiten Stufe ergibt sich dann aus der für das Egofahrzeug abzubauenen Differenzgeschwindigkeit nach vorne. Da dafür jedoch aufgrund der Vorverlagerung der Bremsung um die angenommene Reaktionszeit nur ein begrenzter Zeithorizont zur Verfügung steht, muss zur Einhaltung des Kollisionsvermeidungswunsches nach vorne der Bremsverlauf in einigen Situationen noch um eine Vollverzögerung am Schluss ergänzt werden.

4.3 Aufbau des Gesamtsystems

Während in den vorangegangenen Abschnitten die Einzelkomponenten der Eingriffsstrategie vorgestellt wurden, wird nun deren Zusammenwirken im Gesamtsystem erläutert. Abbildung 4.4 stellt dazu die unterschiedlichen Entscheidungswege hin zur Ermittlung von Eingriffszeitpunkt und -stärke sowie des Warnzeitpunkts in Form eines Ablaufdiagramms dar.

Ausgangspunkt sind die in Kapitel 3 erarbeiteten Grundlagen und Kenngrößen. Aufbauend auf diesen wird zunächst unterschieden, ob ein Spurwechsel gefahrlos durchführbar ist oder ob eine erhöhte Kollisionsgefahr beim Ausweichen $p_{\text{koll,ausw}}$ besteht. Im ersten Fall ergibt sich der Eingriffszeitpunkt der Bremsung aus der Betrachtung der menschlichen Faktoren Reaktionsbedarf, Reaktionszeit und tatsächlicher Reaktion gemäß den Überlegungen aus Abschnitt 4.2.1. Als Verzögerungsverlauf wird eine konstante Vollbremsung gewählt. Eine Betrachtung des Folgeverkehrs erfolgt bei vorhandener Spurwechselmöglichkeit nicht, um die durch die Reaktionsbetrachtung reduzierte Falschauslösewahrscheinlichkeit nicht durch eine Vorverlagerung des Eingriffszeitpunkts wieder zunichte zu machen. Das Folgekollisionsrisiko wird zugunsten des Falschauslöserisikos erhöht, letzteres also höher gewichtet (vgl. Abschnitt 2.4).

Sollte keine Möglichkeit zum Spurwechsel vorhanden sein, entspricht der Eingriffszeitpunkt zunächst dem letztmöglichen Bremszeitpunkt. Zu diesem Zeitpunkt kann die drohende Auffahrkollision noch durch eine systemseitige Vollverzögerung vermieden werden. Da auch dem Fahrer keine andere Alternative zur Verfügung steht, erfolgt damit keine Falschauslösung. Basierend auf dieser Ausgangslage wird die aktuelle Folgeverkehrssituation bewertet. Besteht eine erhöhte Kollisionsgefahr mit einem nachfolgenden Fahrzeug $p_{\text{koll,obj}}$, werden der Eingriffszeitpunkt um die angenommene Fahrerreaktionszeit nach vorne verschoben und als Bremsprofil die degressive Bremsung gewählt. Aufgrund der fehlenden Spurwechselmöglichkeit hat dies keine Auswirkungen auf das Falschauslöserisiko.

Zusammenfassend können aus der Fallunterscheidung also drei unterschiedliche Eingriffszeitpunkte resultieren: zwischen letztmöglichem Brems- und Ausweichzeitpunkt aus der Reaktionsbetrachtung, entsprechend dem letztmöglichen Bremszeitpunkt bei nicht vorhandener Spurwechselmöglichkeit und um die Reaktionszeit früher bei zusätzlich kritischem Folgeverkehr. Der Warnzeitpunkt ergibt sich dann durch eine zeitliche Vorverlagerung um eine typische Vorwarnzeit im Bereich von 1,0 s (vgl. [66]) ausgehend vom ermittelten Eingriffszeitpunkt.

Alle relevanten Zeitpunkte werden als TTC-Schwellen formuliert und ihr Erreichen durch einen Vergleich mit der aktuell vorhandenen TTC ermittelt. Unterschreitet diese den gewählten Eingriffszeitpunkt, wird das entsprechende Verzögerungsprofil eingeregelt. Obwohl die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ansätze gut dazu geeignet sind, fehlerhafte Auslösungen zu vermeiden, sind diese – beispielsweise aufgrund von falschen Umfelddaten – jedoch nicht völlig auszuschließen. Aus diesem Grund müssen Mechanismen vorgesehen werden, die eine initiierte Bremsung vorzeitig beenden:

Zum einen sind dies systemimmanente Maßnahmen wie die kontinuierliche Überprüfung, ob die gewählten Umgebungsobjekte noch die Bedingung zur Bremsung erfüllen (vgl. [66]).

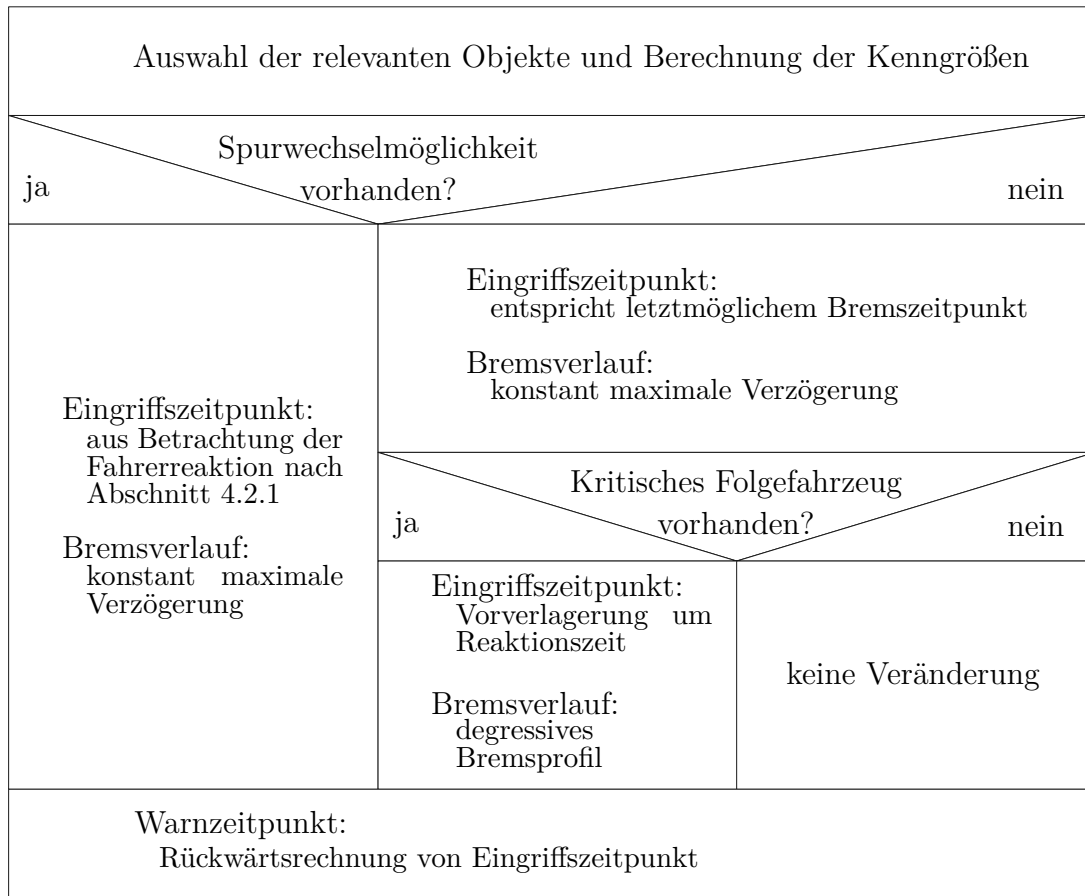


Abbildung 4.4: Ablaufdiagramm zur Festlegung von Brems- und Warnzeitpunkt sowie des Bremsverlaufs

Des Weiteren wünschen sich die Fahrer eines Fahrzeugs mit Gefahrenbremssystem die Möglichkeit, die Bremsung selbständig übersteuern zu können (vgl. [24]). Dazu wird in der vorliegenden Arbeit die bekannte Lösung der Betätigung des Fahrpedals als logische Gegenwirkung zur Bremsung gewählt (vgl. [66]). Wie weit das Fahrpedal zur Übersteuerung betätigt werden muss, ergibt sich dabei proportional zur aktuell eingeregelter Soll-Beschleunigung. Das heißt, dass beispielsweise im zweiten Teil des degressiven Bremsprofils die Schwelle niedriger liegt als im ersten. Dies vermeidet eine unnötig weite Betätigung während des leichten Bremsens sowie eine unerwünscht frühe Erkennung im starken Bremssteil des Verzögerungsverlaufs.

4.4 Zusammenfassung und Diskussion

Für das Falschwarnrisiko wird in Abschnitt 2.3 das Ziel angegeben, den bisherigen Zusammenhang zwischen Wirksamkeit und Verzeihlichkeit einer Vorwarnung aufzuheben. Durch die Transformation einer potentiellen Falschwarnung in eine Unterstützungshandlung, die durch das Konzept der Rückschaltung erreicht wird, scheint dies möglich zu sein. Wie sehr die Überholunterstützung als solche akzeptiert wird und der Schaltruck in Gefahrensi-

tuationen auf den potentiellen Kollisionsgegner hinweist, wird eine Expertenuntersuchung im Rahmen der Evaluation des Ansatzes in Abschnitt 6.2 zeigen. Einschränkend muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass diese Form der Vorwarnung nur in Fahrzeugen mit Automatikgetriebe einsetzbar und der Kreis der potentiellen Nutzer damit beschränkt ist.

Die Reduzierung von Falschauslöse- und Folgekollisionsrisiko bei gleichzeitig geringem Auffahrrisiko ist hingegen nicht ohne Wechselwirkung möglich. Es muss daher ein Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Zielen eingegangen werden. Bei der Festlegung des Eingriffszeitpunkts wird aus diesem Grund die Reaktion des Fahrers abgewartet, bis eine Systembremsung erfolgt. Die Berücksichtigung von menschlichen Faktoren innerhalb physikalischer Grenzen ist dabei eine neuartige Methodik, den Verzicht auf eine kollisionsvermeidende Bremsung auf einen kleinen Teil der Situationen (siehe Fall zwei in Abschnitt 4.2.1) zu reduzieren. Welche Eingriffszeitpunkte im Straßenverkehr tatsächlich auftreten, zeigt die statistische Auswertung realer Messdaten in Abschnitt 6.3.

Die Berücksichtigung des Folgeverkehrs wiederum erfolgt nur, wenn keine Auswirkungen auf das Falschauslöserisiko zu erwarten sind, also bei nicht vorhandener Ausweichmöglichkeit. Dann verlangt der degressive Bremsverlauf dem Folgeverkehr jedoch seine bestmögliche Leistung ab, um die Kollision seinerseits zu vermeiden. Um dies nachzuweisen, muss zunächst das Reaktionsverhalten auf ein degressives Bremsprofil analysiert werden. Zu beachten ist dabei, dass dieses nicht weitere, in Kolonne folgende Fahrzeuge gefährdet. Für die Evaluation der Folgeverkehrsberücksichtigung werden daher in Abschnitt 6.4 simulative Methoden eingesetzt, die eine gefahrlose Untersuchung erlauben. Des Weiteren darf die reduzierte Folgekollisionsrate keine erhöhte Rest-Aufprallgeschwindigkeit im Kollisionsfall hervorrufen und so das gesamte Folgekollisionsrisiko negativ beeinflussen.

KAPITEL 5

Technische Umsetzung

Neben der theoretischen Modellierung des risikoadaptiven Eingriffskonzepts hat dessen Umsetzung im realen Fahrzeug wesentlichen Anteil an der vorliegenden Arbeit. Die Architektur des für diesen Zweck ausgerüsteten Versuchsträgers bietet die Grundlage, die entwickelten Algorithmen effizient zu realisieren. Dessen wesentliche Komponenten werden daher kurz vorgestellt. Des Weiteren wird ein Ausblick auf die Anwendbarkeit des Systems über die bestehende Sensorik hinaus gegeben, das heißt mit alternativer, seriennäherer Sensorkonfiguration.

Auf aktorischer Seite nutzt das Eingriffskonzept sowohl die Bremse als auch Getrieberückschaltungen. Um diese gemäß den Vorgaben nutzen zu können, sind eine Modellierung ihres Systemverhaltens sowie eine Regelungs- und Steuerungsstrategie notwendig, die im zweiten Teil des Kapitels erläutert werden. Abschließend werden die vorgestellten Ansätze diskutiert.

5.1 Beschreibung des Versuchsträgers

Für die Realisierung der in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Eingriffsstrategie wird ein BMW X5 3.0d der Baureihe E70 verwendet. Dieser wurde im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit zu Beginn des Forschungsvorhabens AKTIV⁶ mit hochwertiger Forschungssensorik und der benötigten Datenverarbeitungshardware ausgerüstet (vgl. [66]) und wird im Folgenden kurz vorgestellt. Darüber hinaus wird das Systemverhalten anhand einfacher Szenarien mit alternativer Sensorik abgeschätzt, um die Funktionsfähigkeit des Gesamtkonzepts mit seriennäherer Ausstattung zu evaluieren.

⁶Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr

5.1.1 Ausrüstung

Die Ausrüstung des verwendeten Versuchsträgers (siehe Abbildung 5.1) gliedert sich in die drei Bereiche Sensorik, Datenverarbeitung und Aktorik, die in diesem Abschnitt näher beschrieben werden. Für eine detaillierte Angabe aller technischer Spezifikationen sowie eine Erläuterung der Sensorprinzipien wird an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen (siehe dazu [29, 66, 84, 96]).



Abbildung 5.1: Versuchsträger bei einer Gefahrenbremsung (Bildquelle: BMW AG)

Sensorik

Bei der Sensorausrüstung des Fahrzeugs muss zwischen Sensoren zur Erfassung von Eigenfahrzeug- und von Umfelddaten unterschieden werden. Zur Detektion ersterer kommen auch im Forschungsversuchsträger die serienseitig verbauten Komponenten zur Anwendung. Damit lassen sich vor allem die Längs- und Querbefleunigung, die Gierrate sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit ermitteln. Zusätzlich stehen die für die Reaktionserkennung verwendeten Betätigungen von Gas-, Bremspedal und Fahrtrichtungsanzeiger wie auch die für die Skalierung des Schaltrucks notwendigen Daten über die aktuelle Motordrehzahl sowie den aktuellen Gang zur Verfügung.

Zur Detektion des Fahrzeugumfelds ist das Versuchsfahrzeug beinahe lückenlos mit hochwertiger Forschungssensorik ausgestattet. Die Sichtbereiche der verwendeten Sensoren sind in Abbildung 5.2 qualitativ dargestellt. Forschungssensorik mit hoher Performanz – aber teils hohen Kosten – kommt zur Anwendung, da im frühen Produktstadium zunächst die technische Realisierbarkeit im Vordergrund steht. Sie ermöglicht es, das Verkehrsgeschehen mit hoher Qualität zu beobachten und zu präzisieren, um die Entscheidung zur Initiierung einer Vollbremsung treffen zu können. Im Frontbereich wird daher ein fein auflösender, mehrzeilig scannender Lidarsensor (Light Detection and Ranging – LIDAR) mit einem Öffnungswinkel von $\pm 80^\circ$ und einer Reichweite von bis zu 150 m verwendet (vgl. [66]).

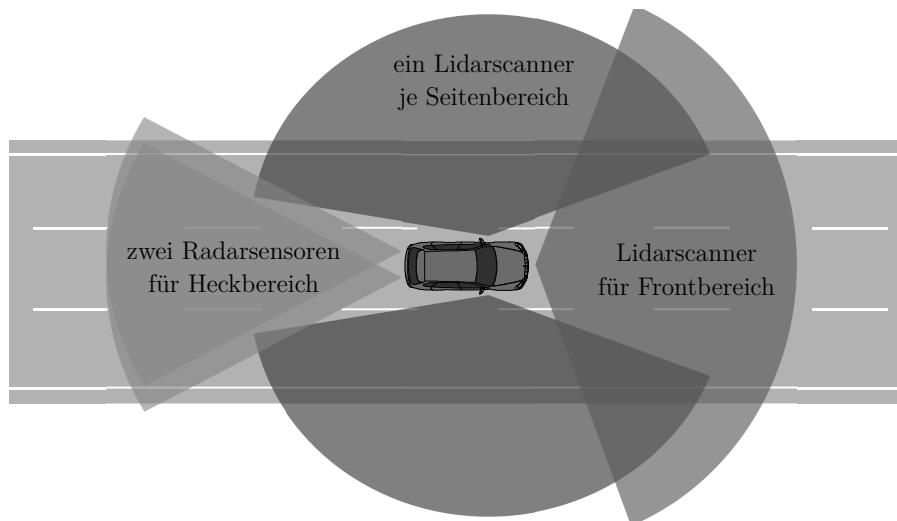


Abbildung 5.2: Qualitative Darstellung der Sichtbereiche der verwendeten Sensoren

Auch im Seitenbereich wird ein scannender Lidarsensor eingesetzt. Sein Öffnungswinkel beträgt 145° bei einer Reichweite von bis zu 90 m (vgl. [66]). Im Vergleich zum Frontbereich weist der Seitenbereichssensor jedoch eine wesentlich geringere Winkelauflösung auf. Da dieser Sensor lediglich zur Bestimmung der Spurwechselemöglichkeit im Seitenbereich und damit nur der direkt gemessene Abstandswert zu anderen Objekten beziehungsweise der Randbebauung verwendet wird, ist er für die vorliegende Anwendung ausreichend.

Im Heckbereich werden zwei Serien-ACC-Radarsensoren verwendet, die im Nahbereich bis 60 m einen Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$ und im Fernbereich bis etwa 200 m einen stärker gebündelten Erfassungskegel mit einem Öffnungswinkel von $\pm 9^\circ$ aufweisen (vgl. [66]). Durch die Positionierung der Sensoren an den Egofahrzeugaußenkanten ist die sichere Detektion von Folgeobjekten auf der Nachbar- und Eigenspur und somit die Bewertung der Spurwechselemöglichkeit im Heckbereich und des Folgeverkehrs möglich.

Datenverarbeitung

Bei der Datenverarbeitung wird zwischen der Aufbereitung der zur Verfügung stehenden Sensordaten und der Berechnung der eigentlichen Fahrerassistenzfunktion unterschieden. Aufgrund der hohen Anzahl an Sensoren und der damit einhergehenden großen Datenmenge, die in jedem Zeitschritt verarbeitet werden muss, sind diese auf unterschiedliche Rechnersysteme verteilt. Die Fusionierung der Daten aller Umfoldsensoren findet auf einem Standard-PC-System statt, welches deren Ausgangsgrößen aufnimmt, diese interpretiert und zu einer Objektliste (vgl. Abschnitt 3.1.1) zusammenfasst (vgl. [2]). Der eigentliche Systemalgorithmus wird auf einer echtzeitfähigen AutoBox der Firma dSPACE realisiert, die mit dem PC zur Sensordatenfusion über Ethernet verbunden ist und die Eigenfahrzeugdaten über das Bus-System des Fahrzeugs erhält. Diese ist vollständig über die MATLAB-Toolbox Simulink der Firma MathWorks programmierbar, mithilfe derer die Algorithmen umgesetzt sind. Ebenfalls über das Bus-System ist die Ansteuerung der Aktorikkomponenten des Versuchsträgers möglich.

Aktorik

Als Aktorikkomponenten stehen die elektrohydraulische Bremse (EHB⁷) sowie das Automatikgetriebe zur Verfügung. Die Bremsenansteuerung erfolgt analog den aktuellen Serienfahrzeugen durch Vorgabe des gewünschten Bremsmoments an das ESP-Steuergerät, dessen Grenzen beim maximal einregelbaren Bremsmoment sowie der maximal erreichbaren Anstiegsrate aufgehoben sind. Als limitierender Faktor verbleibt bei der hier verwendeten EHB die Zeit, bis die Pumpe den notwendigen Bremsdruck aufbaut. Dieser Verzug wird in der Berechnung des letztmöglichen Bremszeitpunkts über die Annahme einer Tot- sowie einer Schwellzeit bereits berücksichtigt.

Den zweiten Aktor stellt das Sechsgang-Automatikgetriebe dar. Da im verwendeten Versuchsträger eine direkte Gangwahl nicht möglich ist, muss der Gangwahlschalter, der im Normalfall vom Fahrer bedient wird, simuliert werden. Dies hat den Vorteil, dass keine unzulässige Geschwindigkeit-Gang-Kombination eingeregelt werden kann, da das Getriebe-Steuergerät die angeforderte Einstellung noch überprüft. Es wird also nicht der gewünschte Gang vorgegeben, sondern die nachgebildete Bewegung des Gangwahlschalters.

5.1.2 Alternative Sensorausrüstung

Wie bereits erwähnt, steht im Forschungsbereich zunächst die Überprüfung der technischen Realisierbarkeit sowie die Abschätzung erreichbarer Potentiale im Vordergrund. Dazu werden hochgenaue Sensoren verwendet, mit deren hohen Kosten jedoch oft eine verminderte Serientauglichkeit einhergeht. Dieser Abschnitt stellt daher bezogen auf einfache Szenarien zwei alternative Sensorkonzepte vor – zum einen eine seriennahe Fusion aus Radar- und Videodaten, zum anderen die Nutzung in Zukunft möglicherweise zur Verfügung stehender Kommunikationsdaten (Car2Car-Kommunikation) –, die den im Frontbereich eingesetzten Lidarsensor ersetzen können und mit diesem verglichen werden. Die Ergebnisse sollen an dieser Stelle nur als erste Einschätzung dienen, die durch eine Reihe weiterer Untersuchungen mit unterschiedlichen Szenarien auch im Realverkehr validiert werden muss. Dies ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Radar-Video-Fusion

Der Verwendung einer Fusion aus Radar- und Videodaten liegt die Hypothese zugrunde, dass die Nachteile der einzelnen Sensoren durch die Stärken des jeweils anderen aufgewogen werden und damit eine vergleichbare Qualität wie die des Lidarsensors erreicht werden kann. Während der Radarsensor vor allem in Längsrichtung eine sehr hohe Genauigkeit aufweist, sind Querbewegungen für ihn aufgrund der geringeren Auflösung in Querrichtung schwer detektierbar. Das Pendant dazu stellt eine Monokamera dar, die systembedingt nur Querinformationen mit hoher Güte liefert. Die Verknüpfung der beiden Sensoren ermöglicht also in beide Koordinaten-Richtungen eine hinreichend exakte Positionsbestimmung.

⁷Alternativ ist auch eine andere automatisiert ansteuerbare Bremse verwendbar. Stellvertretend wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Abkürzung EHB genutzt.

Ob sich mit einer Radar-Video-Fusion die Qualität eines Lidarsensors mit seiner hohen Auflösung bezogen auf ein Gefahrenbremssystem erreichen lässt, kann durch einen Vergleich der Auslösezeitpunkte der Bremsung überprüft werden, der einen eventuellen zeitlichen Verzug der unterschiedlichen Sensorkonzepte direkt wiedergibt. Überprüft wird dazu sowohl ein Manöver in Längs- als auch in Querrichtung. Das Egofahrzeug fährt zum einen auf ein vorausfahrendes und zum anderen auf ein knapp einscherendes (mit variierender Querbesehleunigung) Fahrzeug in einem Differenzgeschwindigkeitsbereich von 5 m/s bis 20 m/s auf. Die Bremsung wird dabei nicht aktiv initiiert, um den Zeitpunkt des später auslösenden Sensorsystems nicht zu verfälschen. Um die Durchführung trotzdem kollisionsfrei zu gestalten, erfolgt die Anfahrt mit einem künstlichen Versatz.

Es zeigt sich, dass die Gefahrenbremsung in allen untersuchten Szenarien (Stichprobe $N = 140$) zum selben Zeitpunkt ausgelöst wird. Das zugrundeliegende Gefahrenbremssystem ist also – bezogen auf die untersuchten Situationen – äquivalent mit der Fusion aus Radar- und Video-Daten darstellbar. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der Datengenauigkeit. Der Unterschied im erkannten Abstandswert in Längs- sowie in Querrichtung zwischen Lidarsensor und Radar-Video-Fusion beträgt im Durchschnitt lediglich 20 cm .

Kommunikationsdaten

Wird die bordautonome Sensorik durch eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ersetzt, muss der relative Abstand zwischen zwei Fahrzeugen über Differenzenbildung der globalen Positionen des Sende- sowie des Egofahrzeugs berechnet werden. Unter der Annahme unkorrelierten Messrauschens addieren sich die Unsicherheiten der Positionsangaben dabei auf. Die Qualität der Abstandsbestimmung über Kommunikationsdaten ist also erheblich abhängig von der zur Verfügung stehenden Positionsgenauigkeit. Unter der Annahme, dass jedoch auch bei Nutzung von Kommunikationsdaten noch Umfeldsensoren zur Verfügung stehen, können diese weiterhin zur Abstandsbestimmung genutzt werden. Aus der Kommunikation finden dann nur die übertragenen Dynamikinformationen Anwendung, die die Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung des Sendefahrzeugs enthalten. In diesem Fall ist ein Matching zwischen den Objekten notwendig, die mithilfe unterschiedlicher Sensorik erkannt wurden (siehe [101]).

Sofern weiterhin der Lidarsensor (oder äquivalent die Radar-Video-Fusion) für die Abstandsermittlung zum Einsatz kommt, ist die Systemleistung auch mit zusätzlichen Kommunikationsdaten bei unbeschleunigten Szenarien völlig unverändert. Ein Vorteil ist jedoch in Situationen mit sich schnell ändernden Verzögerungswerten zu vermuten. Die Hypothese ist hier, dass die Übertragungslatenz zwischen den beiden Fahrzeugen geringer ist als die Latenz zur Ermittlung der Sensorwerte und die tatsächlich vorliegende Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs dem Egofahrzeug dadurch früher zur Verfügung steht.

Überprüft werden demnach Szenarien ($N = 70$), in denen ein vorausfahrendes Fahrzeug bei unterschiedlicher Ausgangsdifferenzgeschwindigkeit (10 m/s bis 20 m/s) und -zeitabstand ($0,5 \text{ s}$ bis $2,0 \text{ s}$) verschieden starke Bremsmanöver ($-2,0 \text{ m/s}^2$ bis $-8,5 \text{ m/s}^2$) durchführt⁸. Als

⁸Inhalte dieses Abschnitts entstanden teilweise im Rahmen der betreuten Abschlussarbeit von Jantschik und wurden bereits veröffentlicht (vgl. [100, 101, 108]).

Vergleichsgröße wird erneut der Auslösezeitpunkt der aktiven Gefahrenbremsung herangezogen – zum einen ohne, zum anderen mit Kommunikationsdaten. Auch hier wird die Bremsung nicht aktiv initiiert und das Szenario mit Versatz durchgeführt.

Abbildung 5.3 zeigt die Ergebnisse, also den Zeitvorteil bei zusätzlicher Nutzung von Kommunikationsdaten gegenüber der reinen Nutzung von bordautonomer Sensorik bei einer plötzlichen Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs, geglättet zwischen den einzelnen Messpunkten. Zur besseren Darstellung sind die Ausgangsdifferenzgeschwindigkeit sowie der Abstand zu Beginn der Bremsung des Vorderfahrzeugs in die bekannte TTC umgerechnet. Diese ist ein Maß für die bereits bestehende Kritikalität, bevor das vorausfahrende Fahrzeug sie zusätzlich durch seine Bremsung verschärft.

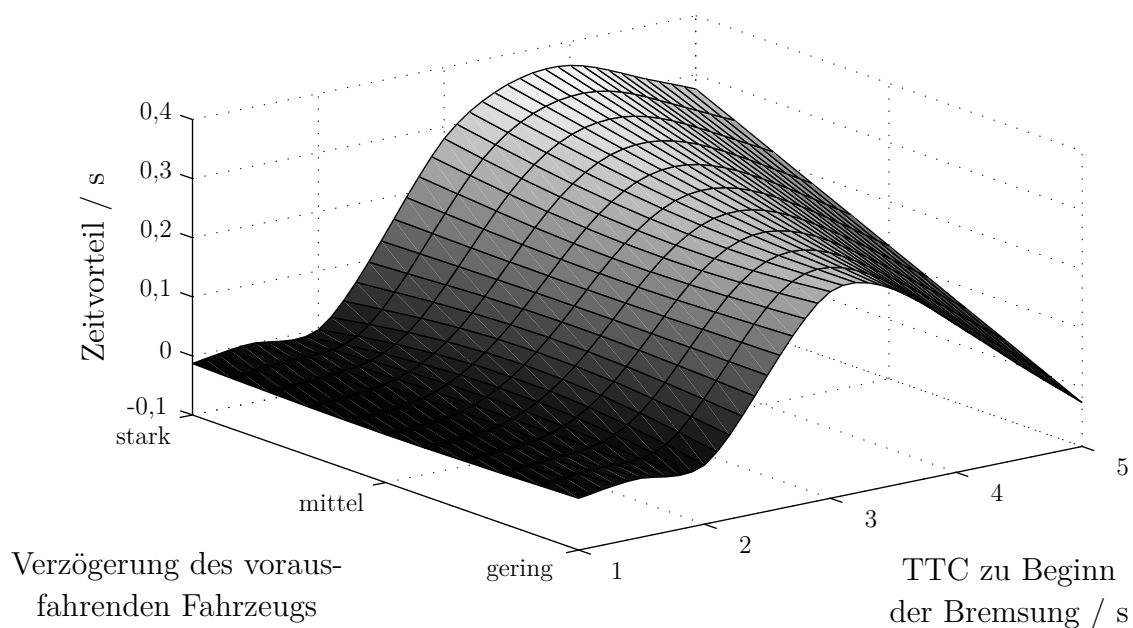


Abbildung 5.3: Zeitvorteil der Kommunikationsdaten gegenüber Lidarsensor bei plötzlicher Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs

Es zeigt sich, dass im Bereich einer TTC kleiner 2,0s kein Unterschied in den Auslösezeitpunkten der Systeme mit und ohne Kommunikationsdaten besteht. Dies liegt an der Tatsache, dass bei Unterschreiten dieser Grenze im untersuchten Geschwindigkeitsbereich bereits durch den reinen Annäherungsprozess eine Gefahrenbremsung notwendig wird – unabhängig davon, ob das vorausfahrende Fahrzeug zusätzlich bremst. Erst mit zunehmender TTC, also größerem Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen zu Beginn des Bremsmanövers, bestätigt sich die vermutete Hypothese. Die frühere Erkennung der Verzögerung des Vorderfahrzeugs führt abhängig von dessen Bremsstärke zu einem Zeitvorteil von 0,25s bis 0,35s. Mit weiter zunehmender TTC zwischen den beiden Fahrzeugen vor der Bremsung nimmt der Zeitvorteil erwartungsgemäß wieder ab, da auch dem latenzbehafteten Sensorsystem genügend Zeit zur Erkennung der Verzögerung bis zur notwendigen Gefahrenbremsung bleibt.

5.2 Realisierung des skalierbaren Schaltrucks

Die erste aktorische Komponente, deren Umsetzung im Folgenden beschrieben wird, stellt die Rückschaltung zur Warnung abgelenkter sowie Unterstützung überholender Fahrer dar⁹. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, soll diese trotz ihrer Abhängigkeit von Ausgangsdrehzahl und -gang im Betrag der resultierenden Längsbeschleunigung stets gleich ausgeprägt sein. Um dies zu erreichen, ist eine überlagerte Betätigung der EHB notwendig, weshalb die in Abbildung 5.4 dargestellte gesamthafte Schaltruckgenerierung in zwei Teile – ein getriebe- sowie ein bremsenseitiges Modul – aufgetrennt ist.

Ausgangspunkt ist der Wunschverlauf des skalierbaren Schaltrucks, der durch das Erreichen eines vorgegebenen Minimums definiert ist. Dieser soll sich zum Zeitpunkt der Warnung möglichst exakt im Längsbeschleunigungsverlauf des Gesamtfahrzeugs widerspiegeln. Dazu ist zunächst die Modellierung des in der aktuellen Situation tatsächlich über das Getriebe auftretenden Schaltrucks (eine Funktion von Drehzahl und Gang) notwendig. Es wird also ein mathematisches Modell benötigt, welches diesen als Längsbeschleunigungsverlauf über der Zeit beschreiben kann. Dieses wird in Abschnitt 5.2.1 vorgestellt.

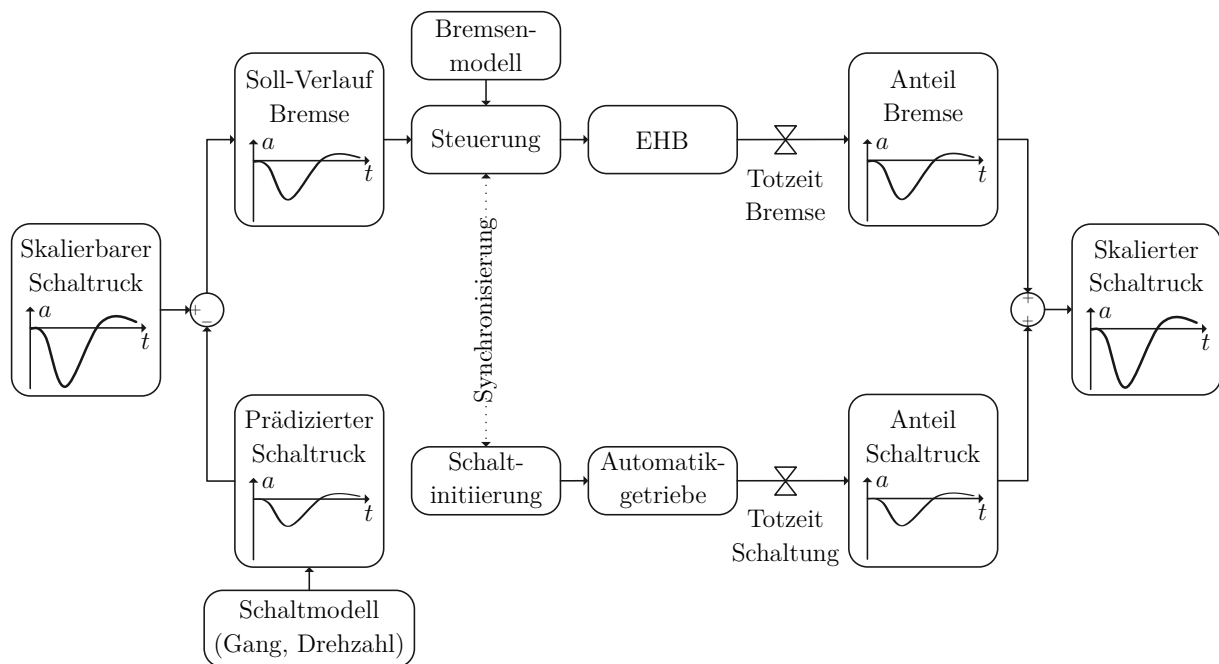


Abbildung 5.4: Aufteilung der Schaltruckgenerierung in bremsen- und getriebeseitiges Modul (vgl. [102])

Durch Subtrahieren des modellierten vom gewünschten Schaltruck resultiert dann der verbleibende Soll-Anteil, der durch die Bremse umgesetzt werden muss. Da dieser ein Bremsmoment und keine Sollverzögerung vorgegeben wird und zusätzlich ein zeitlicher Verzug beim Aufbau des Bremsdrucks berücksichtigt werden muss, wird in Abschnitt 5.2.2 die notwendige Bremsensteuerung entworfen.

⁹Inhalte dieses Abschnitts entstanden teilweise im Rahmen der betreuten Abschlussarbeit von Kohlhuber und wurden bereits veröffentlicht (vgl. [102, 103]).

Sowohl die Schaltinitiierung als auch die Bremsenbetätigung weisen unterschiedlich lange Totzeiten auf, bis sich ihre Wirkung im Beschleunigungsverlauf des Fahrzeugs zeigt. Es ist also eine Synchronisierung notwendig, die dafür sorgt, dass aus der Überlagerung der beiden Anteile der tatsächlich skalierte Sollverlauf resultiert.

5.2.1 Getriebeseitiges Modul

Um den Verzögerungsverlauf während einer Rückschaltung nachzubilden, wird in der vorliegenden Arbeit nicht der Antriebsstrang physikalisch modelliert, sondern ein empirisches Modell geschaffen, dessen Parameter im Realversuch identifiziert werden. Die Abhängigkeiten von Ausgangsgang und -drehzahl werden in diesem parameterbasiert berücksichtigt.

Abbildung 4.1 stellt einen beispielhaften Schaltruck im Längsbeschleunigungsverlauf über der Zeit dar. Um hochfrequente Anregungen durch den Straßenbelag zu eliminieren, ist dieser bereits tiefpassgefiltert. Typisch ist die fallende und dann überhöht ansteigende Flanke, bevor die Rückkehr auf das Nullniveau erfolgt. Das Verhalten nach der Totzeit zeigt dabei einen grundsätzlich PT_2 -ähnlichen Verlauf. Um diesen zu modellieren, wird die Sprungantwort eines PT_2 -Elements im aperiodischen Grenzfall, das heißt mit einem Dämpfungsgrad gleich eins verwendet. Dieser eignet sich besonders gut für die Nachbildung, da der angeregte Endzustand ohne Überschwinger erreicht wird. Gleichzeitig verbleiben nur zwei Parameter – die Anregungsamplitude K_{getr} sowie die Zeitkonstante T_{getr} – in der beschreibenden Gleichung (vgl. [61]):

$$g_{\sigma}(t) = K_{\text{getr}} \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{t}{T_{\text{getr}}} \right) \cdot \exp \left(-\frac{t}{T_{\text{getr}}} \right) \right) . \quad (5.1)$$

Da ein Sprung nur den ersten Teil der Rückschaltung hin zum Minimum beschreiben kann, ist eine erneute Anregung des Systems für die jeweilige Umkehr im Beschleunigungsverlauf notwendig. Es wird daher nicht ein einzelner Sprung, sondern eine Zusammensetzung aus drei verschiedenen, zeitlich versetzten Sprüngen verwendet. Der erste und der dritte Sprung erfolgen dabei in negativer Richtung, um die beiden fallenden Flanken zu modellieren, der zweite in positiver Richtung, um die steigende Flanke abzubilden. Der Rückgang auf das Nullniveau wird durch folgende Bedingung sichergestellt:

$$\sum_{i=1}^3 K_{\text{getr},i} = 0 . \quad (5.2)$$

Um die Einzelsprünge zur richtigen Zeit zu initiieren, wird die Heaviside-Funktion $\Theta(x)$ herangezogen, die zu eins wird, sobald ihr Übergabeargument größer oder gleich null ist:

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ 1 & \text{für } x \geq 0 \end{cases} . \quad (5.3)$$

Jeder Sprung besitzt also eine definierte Totzeit $t_{t,\text{getr},i}$ bis zu seiner Aktivierung. Abbildung 5.5 zeigt zur Verdeutlichung die Einzelsprünge sowie die Zusammensetzung zum resultierenden Verzögerungsverlauf während einer Getrieberückschaltung

$$a_{\text{rs}}(t) = \sum_{i=1}^3 K_{\text{getr},i} \cdot \Theta(t - t_{t,\text{getr},i}) \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{t - t_{t,\text{getr},i}}{T_{\text{getr}}} \right) \cdot \exp \left(-\frac{t - t_{t,\text{getr},i}}{T_{\text{getr}}} \right) \right) . \quad (5.4)$$

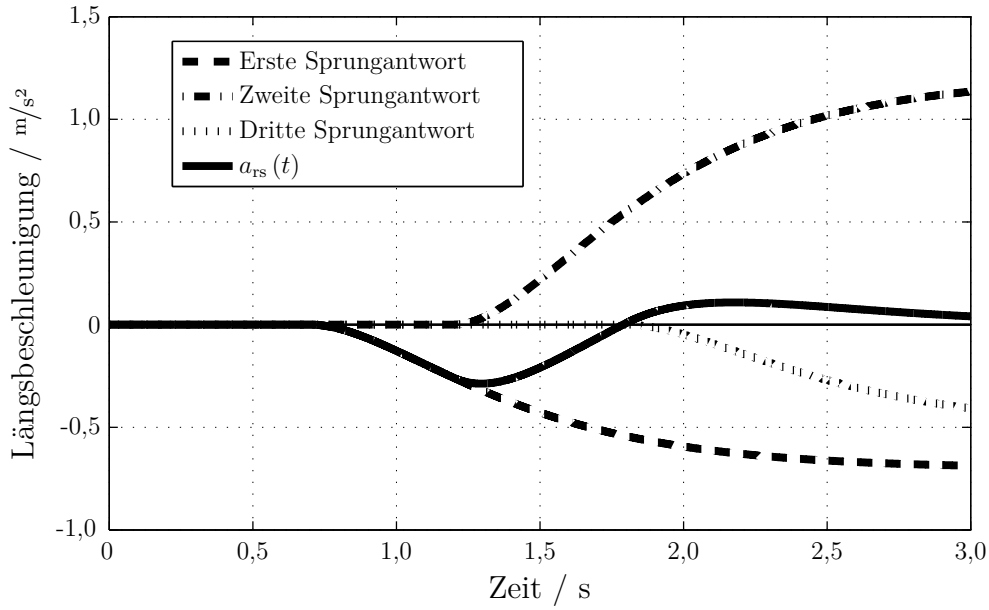


Abbildung 5.5: Einzelsprünge und resultierender Gesamtverlauf zur Beschreibung des Beschleunigungsverlaufs während einer Getrieberückschaltung

Es stehen damit sechs Parameter zur Verfügung, um alle unterschiedlichen Verzögerungsverläufe nachzubilden, die während einer Rückschaltung resultieren können: die Anregungsamplituden $K_{\text{getr},1}$ und $K_{\text{getr},2}$ ($K_{\text{getr},3}$ ist über Gleichung (5.2) definiert), die Zeitkonstante T_{getr} sowie die Totzeiten $t_{t,\text{getr},1}$, $t_{t,\text{getr},2}$ und $t_{t,\text{getr},3}$. Ziel ist die Identifikation eines Parametersatzes für jeden der sechs Gänge, der die Variabilität der Verläufe im Hinblick auf Minimum/ Maximum, Skalierung und Flankensteilheit bestmöglich beschreibt. Innerhalb des Gangs soll lediglich eine Abhängigkeit von der Motordrehzahl n_{mot} bestehen. Aus empirischen Versuchen zeigt sich, dass dazu eine lineare Variation notwendig ist. Auch skalieren die beiden späteren Totzeiten gleich mit der Drehzahl, weshalb ein Variationsparameter $p_{\text{var,getr},i}$ ersetzt werden kann:

$$\begin{pmatrix} t_{t,\text{getr},1} \\ t_{t,\text{getr},2} \\ t_{t,\text{getr},3} \\ T_{\text{getr}} \\ K_{\text{getr},1} \\ K_{\text{getr},2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{\text{var,getr},1} \\ p_{\text{var,getr},2} \\ p_{\text{var,getr},2} \\ p_{\text{var,getr},3} \\ p_{\text{var,getr},4} \\ p_{\text{var,getr},5} \end{pmatrix} \cdot n_{\text{mot}} + \begin{pmatrix} p_{\text{var,getr},6} \\ p_{\text{var,getr},7} \\ p_{\text{var,getr},8} \\ p_{\text{var,getr},9} \\ p_{\text{var,getr},10} \\ p_{\text{var,getr},11} \end{pmatrix}. \quad (5.5)$$

Um die resultierenden elf Parameter zu identifizieren, wird pro Gang in diskreten Motordrehzahl-Schritten von 200 1/min jede mögliche Rückschaltung im Realversuch aufgezeichnet. Mithilfe einer Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den Originalwerten der Messung \vec{a}_{mess} und dem entwickelten Modell $f(\vec{n}_{\text{mot}}, \vec{p}_{\text{var,getr}})$ wird dann versucht, die Parameter $\vec{p}_{\text{var,getr}}$ zu ermitteln. Da die Messungen zeitdiskret vorliegen, erfolgt die Auswertung des Modells ebenfalls zu den Zeitschritten \vec{t}_{mess} . Das Optimierungsproblem lautet damit

$$\min_{\vec{p}_{\text{var,getr}}} \left\| f(\vec{n}_{\text{mot}}, \vec{p}_{\text{var,getr}}, \vec{t}_{\text{mess}}) - \vec{a}_{\text{mess}} \right\|_2^2. \quad (5.6)$$

Zusammenfassend resultiert also für jeden der Gänge zwei bis sechs ein Satz von elf optimierten Parametern, die in einem Look-Up-Table-Verfahren nachgeschlagen werden können. Das gesamte Sechsgang-Getriebe beim Zurückschalten lässt sich demnach mit 55 Parametern nachbilden. Die Güte dieser Modellierung für einen Gang in Abhängigkeit der momentanen Motordrehzahl zeigt beispielhaft Abbildung 5.6.

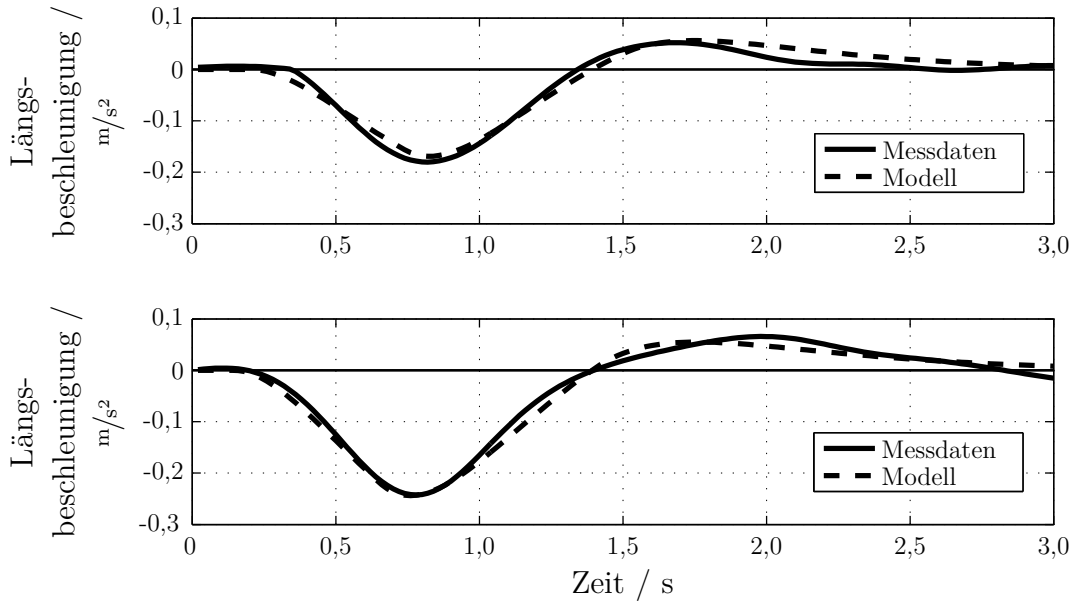


Abbildung 5.6: Beispielhafter Verlauf von Messdaten und Schaltmodell bei Ausgangsgang fünf und Ausgangsdrehzahl 2000 $1/\text{min}$ (oben) und 2800 $1/\text{min}$ (unten)

5.2.2 Bremsenseitiges Modul

Bei Betrachtung der resultierenden Verzögerungsverläufe nach Vorgabe eines Bremsmomentsprungs (siehe Abbildung 5.7) zeigt auch die EHB ein PT_2 -Verhalten, das sich mithilfe der im getriebeseitigen Modul eingeführten Sprungantwort im aperiodischen Grenzfall nach Gleichung (5.1), zuzüglich der Totzeit der Bremse $t_{t,\text{ehb}}$, modellieren lässt:

$$g_{\sigma}(t) = K_{\text{ehb}} \cdot \Theta(t - t_{t,\text{ehb}}) \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{t - t_{t,\text{ehb}}}{T_{\text{ehb}}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t - t_{t,\text{ehb}}}{T_{\text{ehb}}}\right) \right) . \quad (5.7)$$

Während im vorangegangenen Abschnitt das Modell jedoch nur mit der Motordrehzahl skaliert, besteht bei der Bremse eine Abhängigkeit vom vorgegebenen Bremsmoment M_{ehb} sowie von der aktuellen Ausgangsgeschwindigkeit $v_{x,\text{ego}}$ (siehe Abbildung 5.7). Die in diesem Fall zur Verfügung stehenden Parameter K_{ehb} , $t_{t,\text{ehb}}$ und T_{ehb} zur Modellierung des Verzögerungsverhaltens also erneut linear zu variieren, wird diesem Zusammenhang nicht gerecht. Empirische Versuche führen zu folgendem Gleichungssystem mit den Variations-

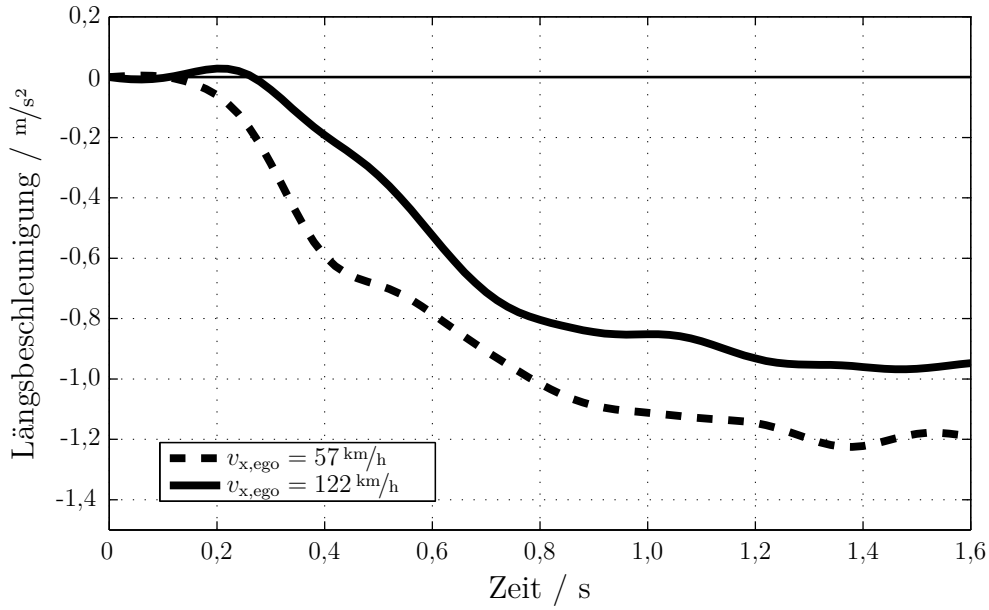


Abbildung 5.7: Bremsverhalten nach Vorgabe eines Bremsmoments von 1800 Nm bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

parametern $p_{\text{var,ehb},i}$:

$$\begin{pmatrix} t_{\text{t,ehb}} \\ T_{\text{ehb}} \\ K_{\text{ehb}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ p_{\text{var,ehb},1} \\ p_{\text{var,ehb},2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_{\text{var,ehb},3} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_{\text{x,ego}} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ p_{\text{var,ehb},4} \end{pmatrix} \cdot M_{\text{ehb}} + \begin{pmatrix} 0 \\ p_{\text{var,ehb},5} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_{\text{x,ego}}^{p_{\text{var,ehb},6}} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ p_{\text{var,ehb},7} \end{pmatrix} \cdot M_{\text{ehb}} \cdot v_{\text{x,ego}}^{p_{\text{var,ehb},8}}. \quad (5.8)$$

In diesem skaliert die Verstärkung K_{ehb} , die die erreichte Maximalverzögerung beschreibt, bei konstanter Geschwindigkeit linear mit dem vorgegebenen Bremsmoment. Abbildung 5.8 zeigt jedoch, dass dieser Zusammenhang in Realität nichtlinear ist. Ab einer Grenze $M_{\text{ehb,schwell}} \approx 1000 \text{ Nm}$ nimmt die maximal erreichte Verzögerung überproportional im Vergleich zu geringeren Bremsmomenten zu. Die Beschreibung von K_{ehb} in Gleichung (5.8) wird daher in zwei Teile aufgespalten, in denen jeweils Linearität gilt:

$$K_{\text{ehb}} = \begin{cases} K_{\text{ehb},1} & \text{für } M_{\text{ehb}} \leq M_{\text{ehb,schwell}} \\ K_{\text{ehb},2} & \text{für } M_{\text{ehb}} > M_{\text{ehb,schwell}} \end{cases} \quad (5.9)$$

mit

$$\begin{pmatrix} K_{\text{ehb},1} \\ K_{\text{ehb},2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{\text{var,ehb},2} \\ p_{\text{var,ehb},9} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_{\text{var,ehb},4} \\ p_{\text{var,ehb},10} \end{pmatrix} \cdot M_{\text{ehb}} + \begin{pmatrix} p_{\text{var,ehb},7} \\ p_{\text{var,ehb},7} \end{pmatrix} \cdot M_{\text{ehb}} \cdot v_{\text{x,ego}}^{p_{\text{var,ehb},8}}. \quad (5.10)$$

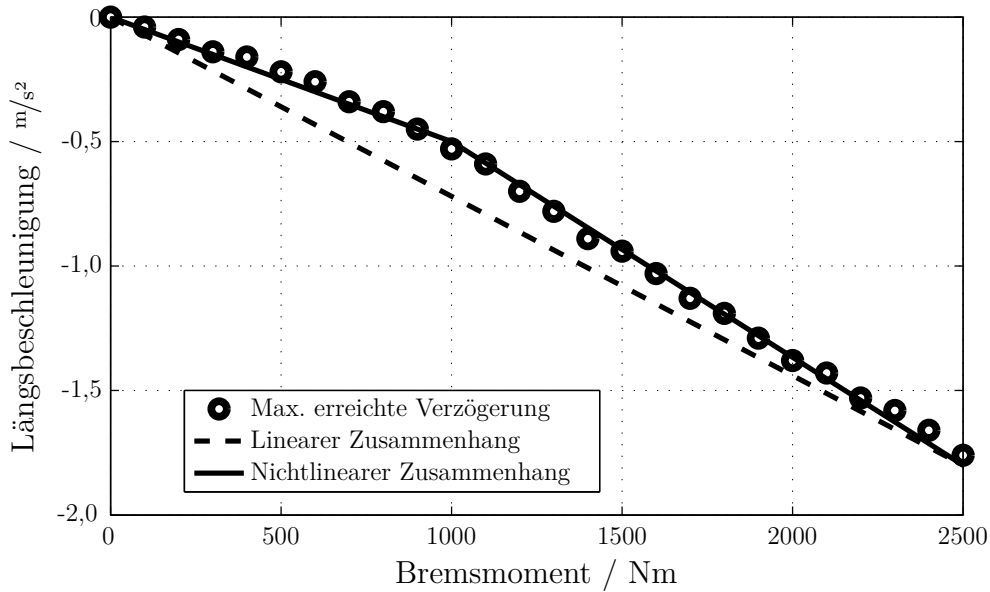


Abbildung 5.8: Maximal erreichte Verzögerungen nach Bremsmomentensprung bis 2500 Nm bei Ausgangsgeschwindigkeit 60 km/h

Das vollständige Modell der elektrohydraulischen Bremse besteht somit aus zehn Parametern $p_{\text{var,ehb},i}$, die wie im vorangegangenen Abschnitt über eine Kleinste-Quadrate-Minimierung gemäß Gleichung (5.6) anhand realer Messdaten identifiziert werden. Aufbauend auf dieser Strecke soll im Folgenden eine Ansteuerung für die Bremse entwickelt werden, die die Dynamik des Bremsverhaltens kompensiert. Eine Steuerung wird verwendet, um den Verlauf des Schaltrucks unabhängig von äußeren Störgrößen dem Fahrzeug stets gleich aufzuprägen.

Zunächst wird die Strecke Bremse-Fahrzeug in zwei Teile aufgespaltet: die lineare PT₂-Dynamik sowie den Verstärkungsteil, der durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Bremsmoment und erreichbarer Maximalverzögerung beschrieben wird. Diese Aufteilung ermöglicht es, die Steuerung unter Vernachlässigung der Verstärkung umzusetzen und somit eine Sollverzögerung vorzugeben, die dann durch eine Umkehr des nichtlinearen Zusammenhangs in das zu stellende Bremsmoment umgerechnet wird. Dies ist möglich, da jener streng monoton fallend ist und sich somit eindeutig invertieren lässt.

Die Steuerung selbst besteht aus einer Regelung des simultan mitlaufenden Bremsenmodells $G(s)$, das der unverstärkten PT₂-Übertragungsfunktion entspricht. Nach Föllinger eignet sich dazu ein realer PID-Regler, der genaues Folgeverhalten und ruhigen Stellgrößenverlauf kombiniert und die dominante Streckenzeitkonstante gut kompensieren kann. Seine Übertragungsfunktion mit der Regler-Zeitkonstanten T_{regl} sowie der Regler-Verstärkung K_{regl} lautet (vgl. [26])

$$R(s) = K_{\text{regl}} \cdot \frac{T_{\text{ehb}}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\text{ehb}} \cdot s + 1}{s \cdot (T_{\text{regl}} \cdot s + 1)}. \quad (5.11)$$

Zur Ermittlung der Regler-Zeitkonstanten T_{regl} wird der Zusammenhang $T_{\text{ehb}}/T_{\text{regl}} =$

10...50 verwendet (vgl. [26]). Für die Regler-Verstärkung resultiert aus simulativen Untersuchungen ein Wert von $K_{\text{regl}} = 40$, der gutes Folgeverhalten garantiert, ohne das Stell-signal zu Schwingungen anzuregen.

Die Gesamtübertragungsfunktion der in Rückkopplung verschalteten Blöcke zur Steuerung der Bremse ergibt sich damit zu

$$S(s) = \frac{R(s)}{1 + R(s) \cdot G(s)} = \frac{T_{\text{ehb}}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\text{ehb}} \cdot s + 1}{\frac{T_{\text{regl}}}{K_{\text{regl}}} \cdot s^2 + \frac{1}{K_{\text{regl}}} \cdot s + 1} . \quad (5.12)$$

Abbildung 5.9 zeigt beispielhaft das Folgeverhalten der Bremse bei Vorgabe eines Schaltruck-förmigen Soll-Verlaufs bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Vor allem die Totzeit sowie der qualitative Verlauf werden sehr exakt wiedergegeben. Die Abweichungen in den Absolutwerten sind auf mögliche Störgrößen wie Fahrbahnanregungen oder Witterungseinflüsse zurückzuführen, bedeuten für die Verwertbarkeit der Steuerung jedoch keine Einschränkung.

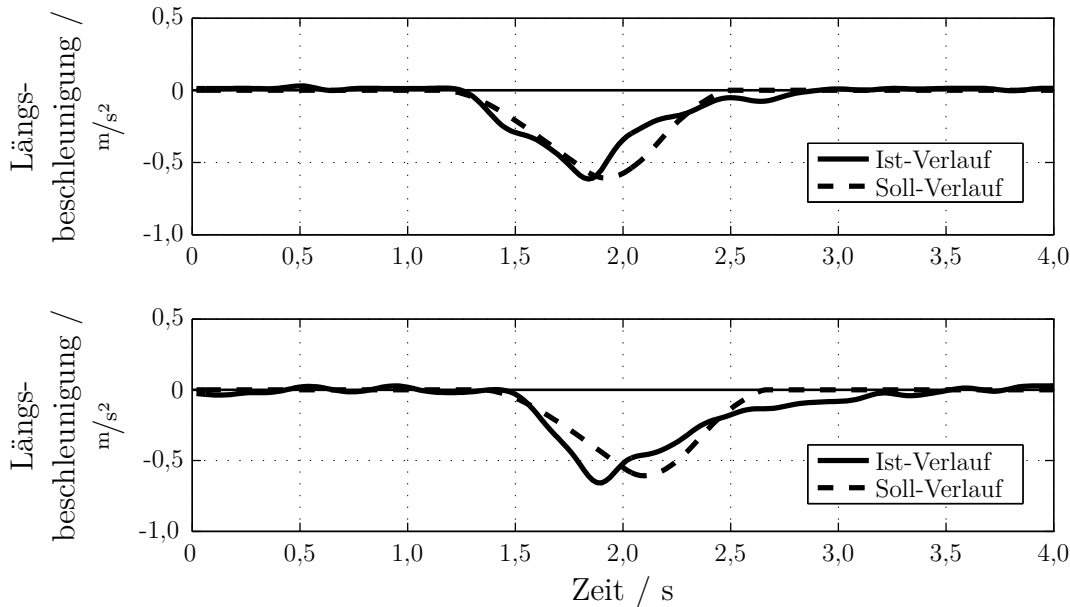


Abbildung 5.9: Beispielhafter Soll-Ist-Vergleich der Bremsensteuerung bei Ausgangsgeschwindigkeit 28 km/h (oben) und 103 km/h (unten)

5.2.3 Validierung des Zusammenwirkens von Getriebe und Bremse

In der Einleitung zu Abschnitt 5.2 wird propagiert, dass sich die Anteile von bremsen- und getriebeseitigem Modul zum gewünschten Soll-Verlauf überlagern. Dies soll anhand empirischer Fahrversuche nachgewiesen werden, bei denen bei unterschiedlichsten Geschwindigkeiten von 30 km/h bis 180 km/h skalierte Rückschaltungen ausgelöst werden. Der Wunschverlauf ist dabei durch das Minimum $a_{x,\text{min}} = -0,6 \text{ m/s}^2$ definiert. Als Ausgangsgang wird

derjenige verwendet, der bei der entsprechenden Geschwindigkeit standardmäßig durch das Getriebesteuergerät gewählt wird.

Abbildung 5.10 stellt exemplarisch drei Geschwindigkeiten dar. Die Ergebnisse aller anderen Aufnahmen sind äquivalent. Die Soll-Kurve ist totzeitbereinigt dargestellt, das heißt zeitlich verschoben. Es zeigt sich, dass der Ist-Verlauf seiner Soll-Vorgabe entlang der ersten Flanke sehr gut folgen kann. Das Totzeitverhalten ist exakt nachgebildet, die beiden Kurven senken sich nahezu gleichzeitig. Der gewünschte Ruck setzt demnach zum vorgesehenen Zeitpunkt ein – auch das angestrebte Minimum wird erreicht.

Während der Verlauf nach der Umkehr in die aufsteigende Flanke ebenfalls noch der Vorgabe folgt, divergieren Soll- und Ist-Kurve bei Erreichen des Überschingers oberhalb des Null-Niveaus. An dieser Stelle versucht die Bremsenansteuerung, positive Radmomente – also eine Beschleunigung – auf das Fahrzeug aufzubringen. Dies ist zwar technisch über das Motorsteuergerät realisierbar, bei der Anwendung in einem Gefahrenbremsssystem jedoch wenig wünschenswert. Der Überschinger ist demnach mithilfe der Überlagerung von Bremse und Schaltung nicht vollständig darstellbar. Auf die gefühlte Wahrnehmung der verstärkten Rückschaltung hat dies jedoch keine Auswirkungen.

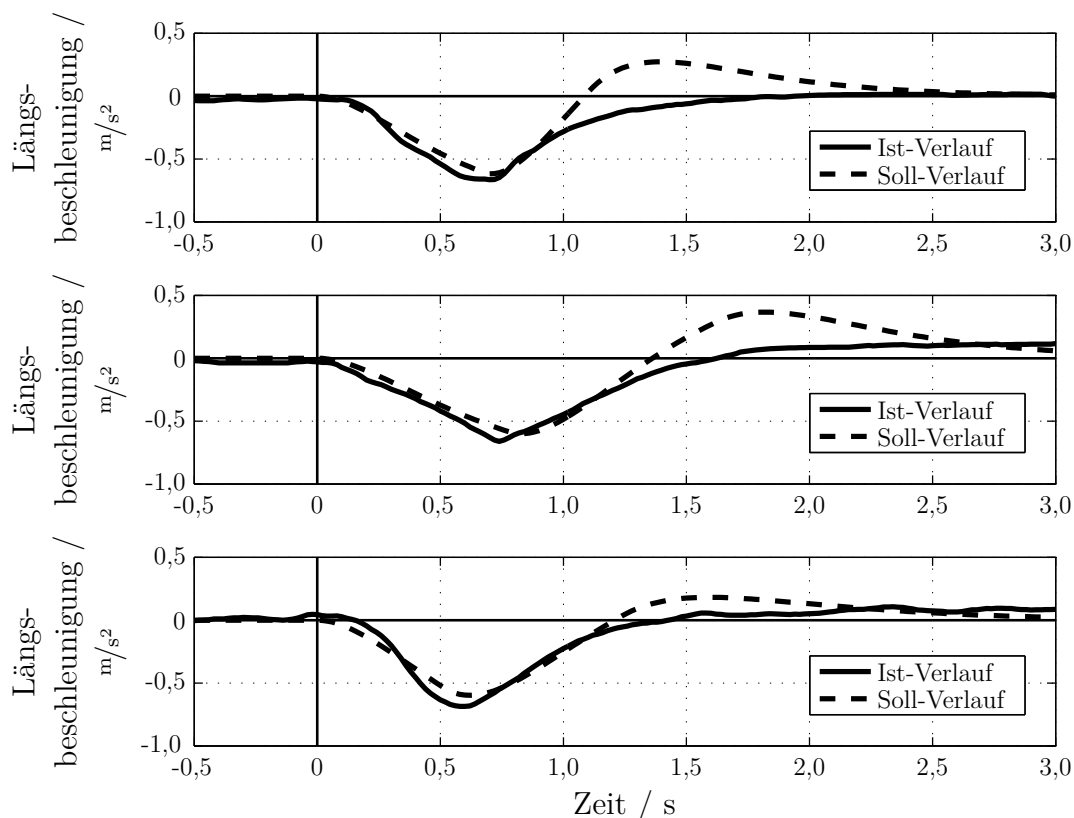


Abbildung 5.10: Beispielhafter Soll-Ist-Vergleich der Überlagerung bei Ausgangsgeschwindigkeit 31 km/h (oben), 79 km/h (Mitte) und 138 km/h (unten)

5.3 Aktorikansteuerung bei hochdynamischen Bremsmanövern

Für die Ansteuerung der Bremse während der eigentlichen Vollbremsung und während des degressiven Bremsprofils wird ein aus der Literatur zur Verzögerungsregelung bekannter PI-Regler mit Vorsteuerungsanteil genutzt (siehe [66, 93]). Letzterer ergibt sich aus der Umrechnung des zu stellenden Radmoments in die Soll-Verzögerung mit der Masse des Egofahrzeugs m_{ego} sowie dem dynamischen Reifenradius r_{dyn} . Dieser lässt sich über den nominellen Reifenradius r_{nom} sowie den statischen Reifenradius r_{stat} , also den Abstand zwischen Reifenmittelpunkt und Aufstandsfläche im Stillstand, abschätzen (vgl. [75]):

$$M_{\text{ehb,soll}} = a_{\text{x,ego,soll}} \cdot m_{\text{ego}} \cdot r_{\text{dyn}} \text{ mit} \quad (5.13)$$

$$\frac{r_{\text{nom}} - r_{\text{dyn}}}{r_{\text{nom}} - r_{\text{stat}}} \approx \frac{1}{3}. \quad (5.14)$$

Dass im Gegensatz zu den geringen Bremsmomenten, die für das bremsenseitige Modul bei der Schaltruckgenerierung notwendig sind, bei höheren tatsächlich ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen dem angeforderten Bremsmoment und der erreichten Maximalverzögerung besteht, zeigt Abbildung 5.11.

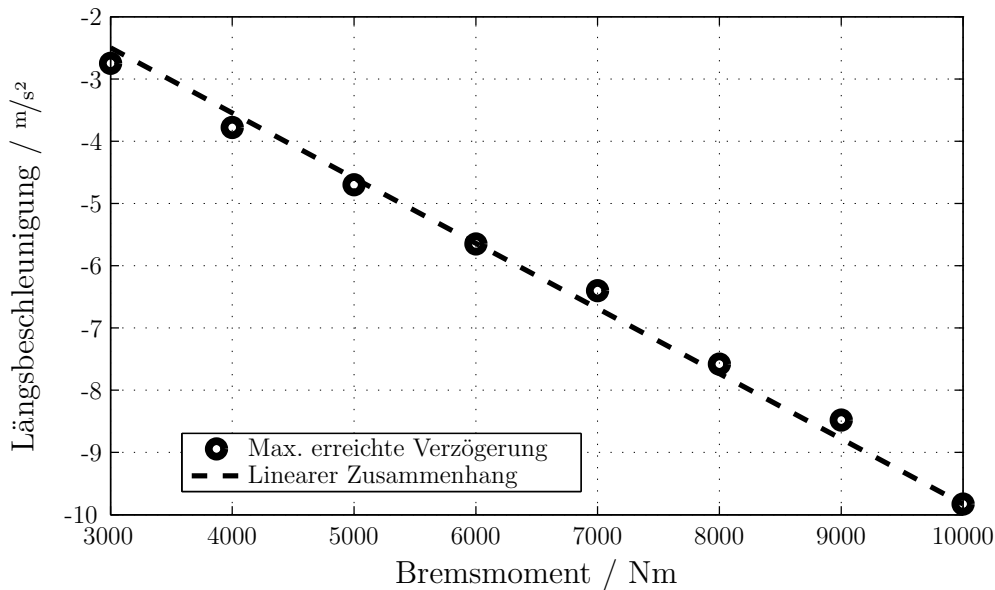


Abbildung 5.11: Maximal erreichte Verzögerungen nach Bremsmomentensprung bis 10000 Nm bei Ausgangsgeschwindigkeit 60 km/h

Die verbleibenden Ungenauigkeiten bedingt durch beispielsweise schwankende Beladungen oder wechselnde Witterungseinflüsse sowie die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Verzögerung werden durch den Regelungsanteil kompensiert. Nitz stellt die Einstellregeln bezogen auf eine reine Vollbremsregelung auf (vgl. [66]). Dass die Güte der Regelung jedoch auch bei Vorgabe von gestuften Verläufen wie dem degressiven ausreichend hoch ist, zeigt

Abbildung 5.12. Zur besseren Darstellung ist der Soll-Verlauf erneut um die Totzeit verschoben und direkt mit dem Ist-Verlauf überlagert dargestellt.

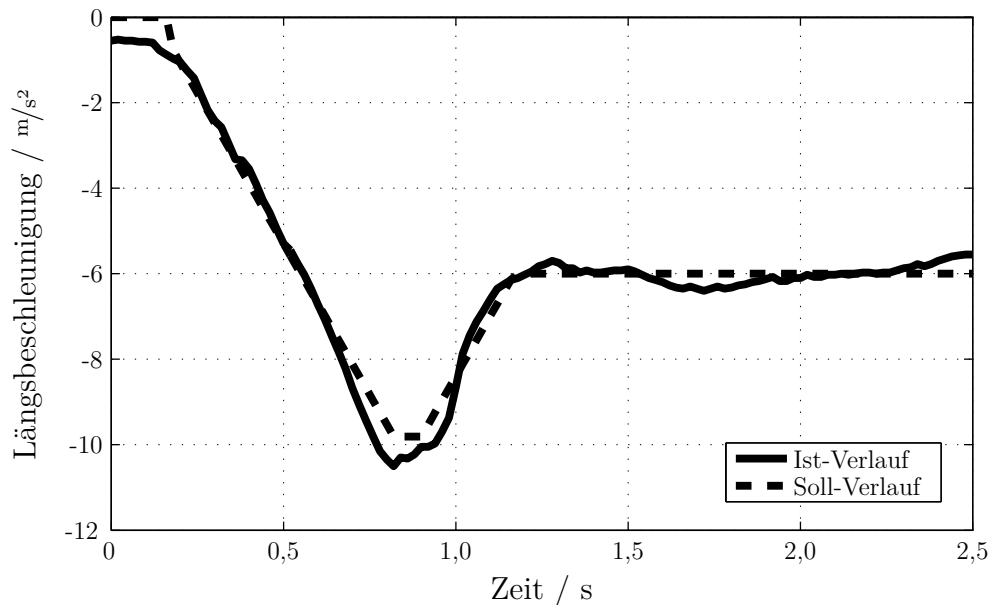


Abbildung 5.12: Folgeverhalten des PI-Reglers bei gestufter Verzögerungsvorgabe

5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Mit dem vorgestellten Versuchsträger sind sowohl software- als auch hardwareseitig die technischen Voraussetzungen gegeben, die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte umzusetzen und mit Realdaten zu evaluieren. Dass die Anwendbarkeit eines Kollisionsvermeidungssystems nicht an den Grenzen zur Serienentwicklung endet, zeigen die positiven Ergebnisse mit alternativen Sensoren, die im Rahmen weiterer Untersuchungen noch validiert werden müssen.

Völlig neuartig ist die Realisierung eines skalierbaren Schaltrucks, der sich aus einem getriebe- und einem bremsenseitigen Modul zusammensetzt und in seiner Amplitude frei parametrierbar ist. Das in diesem Rahmen entstandene Modell zur Beschreibung des Längsbeschleunigungsverlaufs während eines Rückschaltvorgangs ist möglicherweise auch über die Anwendung in einem Gefahrenbremsssystem hinaus nutzbar. Der Verlauf der realen Rückschaltung wird durch eine überlagerte Bremsung verstärkt. Dazu wurde eine Bremsenansteuerung entworfen, die den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Bremsmoment und erreichter Verzögerung sowie die Streckendynamik kompensiert. Durch die Verwendung einer Bremse besteht jedoch die Einschränkung, dass positive Beschleunigungswerte nicht nachgebildet werden können. Dies führt dazu, dass von den typischen drei Flanken nur zwei skalierbar sind.

Für die Bremsenansteuerung während des eigentlichen Gefahrenbremsvorgangs wird auf eine bekannte PI-Regelungsstrategie zurückgegriffen. Obwohl diese ursprünglich für eine

konstante Vollverzögerung ausgelegt wurde, erreicht sie auch bei gestuften Verzögerungsverläufen wie dem degressiven Bremsprofil gutes Folgeverhalten.

Die Evaluierung der in dieser Arbeit vorgestellten Eingriffsstrategie im realen Fahrzeug erhöht die Aussagekraft der zu erwartenden Ergebnisse deutlich gegenüber rein simulativen Untersuchungen. Lediglich in Szenarien, in denen die reale Evaluation ein zu großes Gefahrenpotential bei der Versuchsdurchführung birgt (vor allem bei der Beurteilung des Folgekollisionsrisikos), werden die Untersuchungen weiterhin rechnergestützt betrieben.

KAPITEL 6

Evaluation der Risikoreduktion

Inwieweit sich die vorgestellte Eingriffsstrategie tatsächlich in einem reduzierten Risiko von Falschauslösungen, -warnungen und Folgekollisionen niederschlägt, wird in diesem Kapitel anhand weitreichender Untersuchungen validiert. Zum Einsatz kommen dazu neben dem bereits vorgestellten Versuchsträger auch Simulationswerkzeuge, die zunächst kurz vorgestellt werden. Die identifizierten Risiken werden dann jeweils einzeln gemäß ihrer Definitionen mit einem Gefahrenbremssystem ohne risikoadaptive Eingriffsstrategie verglichen. Dabei finden sowohl subjektive Probandenbeurteilungen als auch objektive Messdatenauswertungen Anwendung. Die gewählte Methodik wird jeweils ausführlich zu Beginn des Abschnitts beleuchtet. Sofern Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Risiken bestehen, werden diese in den entsprechenden Abschnitten thematisiert und bewertet. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der quantifizierten Ergebnisse und deren Diskussion.

6.1 Simulative Evaluationswerkzeuge

Während Evaluationen im Realfahrzeug eine hohe Aussagekraft besitzen, stoßen sie bei der Untersuchung kritischer Situationen, bei denen nichtsdestotrotz eine gefahrlose Versuchsdurchführung gewährleistet sein muss, an ihre Grenzen. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist dies vor allem bei der Betrachtung möglicher Folgekollisionen der Fall, weshalb deren Beeinflussung durch die vorgestellte Eingriffsstrategie simulativ ausgewertet wird. Ein großer Vorteil dabei ist, dass unterschiedliche Konstellationen einfach eingestellt und reproduziert werden können, ohne von einer Vielzahl von Testfahrern abhängig zu sein (vgl. [51]).

Die aus den Simulationen resultierenden Messwerte müssen jedoch kritisch betrachtet werden und sind nicht direkt auf die Realität übertragbar. Untersuchungen zeigen aber, dass bei einem Vergleich mehrerer Varianten relative Validität herrscht (vgl. [50]). Das bedeutet, dass ermittelte (signifikante) Unterschiede auch in Realität gelten, die Beurteilung

der Veränderung des Folgekollisionsrisikos also möglich ist.

Zur Anwendung kommen sowohl Fahr- als auch Verkehrssimulationsuntersuchungen. Beiden gemein ist, dass sich der Fahrer in einer virtuellen Umwelt mit simuliertem Fahrzeugverhalten bewegt. Im ersten Fall ist jedoch das menschliche Verhalten real, abgebildet durch eine Versuchsperson in einer so genannten Sitzkiste. Im verwendeten statischen Fahr-simulator ist diese vor einer Leinwand mit 3,15 m Radius platziert und bietet dem Fahrer einen Sichtbereich von circa 220° horizontal und 20° vertikal nach unten sowie 25° nach oben. Die Ansichten in den beiden Außen- und im Innenspiegel werden durch rückseitig aufgestellte Monitore gewährleistet (vgl. Abbildung 6.1).

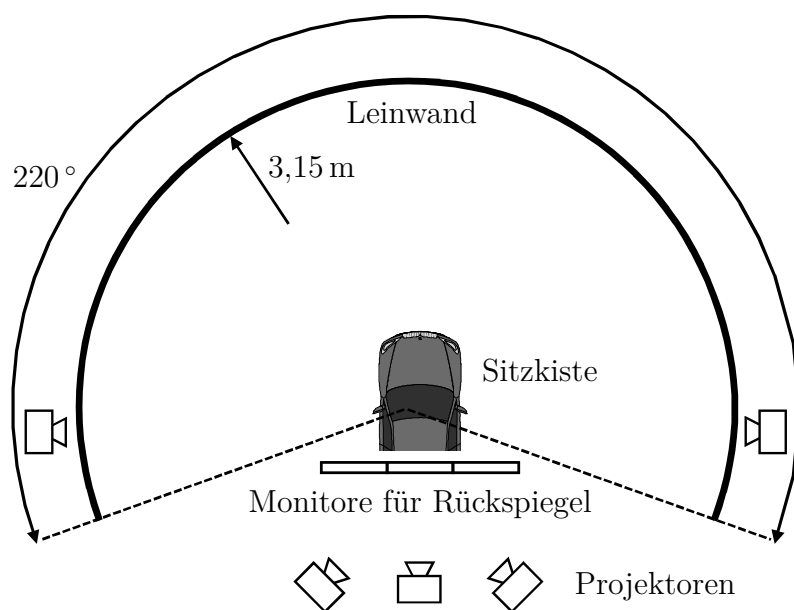


Abbildung 6.1: Schematischer Aufbau des verwendeten statischen Fahr-simulators

Die Sitzkiste selbst ist ein maßstabsgetreues Modell der BMW-Baureihe E60, das hinter den Vordersitzen abgeschnitten ist. Der Aufbau des Innenraums entspricht dem des Serienfahrzeugs und ermöglicht dem Versuchsfahrer die gewohnte Nutzung aller Anzeigen im Kombiinstrument sowie aller Bedienelemente und der Pedalerie. Zusätzlich ist ein Head-Up-Display umgesetzt, das die aktuelle Geschwindigkeit in das Blickfeld des Fahrers projiziert. Eine Ablenkung in den untersuchten Situationen durch Blickabwendung hin zum Kombiinstrument wird damit unwahrscheinlich.

Eine Einschränkung stellt das Bremsgefühl vor allem während einer Vollverzögerung dar. Zum einen bietet das Bremspedal nicht das gewohnte Druckgefühl bis hin zum Vibrieren im Regelbereich, zum anderen ist im statischen Fahr-simulator das gefühlte Verzögern nur durch eine Nachbildung des Bremsnickens durch Neigen der Projektion und zusätzliche akustische Effekte darstellbar. Messdaten, die vor einer Bremsung des Versuchsfahrers aufgezeichnet werden, sind daher sehr gut verwendbar – weniger jedoch Daten während und nach der Bremsung.

Während sich ein Fahr-simulator für die Betrachtung eines einzelnen Folgefahrzeugs anbietet, ist für die Untersuchung mehrerer, in Kolonne fahrender Fahrzeuge eine Verkehrs-

simulation notwendig. Hier wird auch der Fahrer durch ein Modell ersetzt und reagiert im Zusammenwirken mit virtuellem Fahrzeug und Umfeld. In der vorliegenden Arbeit wird das Simulationsprogramm PELOPS verwendet (vgl. [27]), in das die in der Fahrsimulation gewonnenen Ergebnisse übernommen werden. Die Algorithmik des entwickelten Eingriffskonzepts wird dabei direkt in das Fahrzeugmodell innerhalb der Simulationsumgebung integriert. Es können demnach dieselben Modelle wie im Realfahrzeug verwendet werden.

6.2 Reduzierung des Falschwarnrisikos

Wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, ist das Falschwarnrisiko im Rahmen der vorliegenden Arbeit als direkt proportional zur Verzeihlichkeit einer ungerechtfertigt ausgegebenen Warnung definiert. Gleichsam soll eine hohe Verzeihlichkeit jedoch nicht zulasten einer reduzierten Wirksamkeit im Nutzenfall erreicht werden. Das bedeutet, dass das neuartige Warnkonzept abgelenkte Fahrer weiterhin auf eine potentielle Auffahrkollision aufmerksam machen muss. Ziel ist also eine erhöhte Verzeihlichkeit bei gleichzeitig hoher Wirksamkeit im Vergleich zu den bisherigen Vorwarnungsvarianten. Als Vergleichsbasis dienen dabei jeweils die optische und akustische BMW-Serienlösung sowie ein haptischer Bremsruck mit einem Bremsmoment $M_{\text{ehb,soll}} = -6000 \text{ Nm}$ für 0,3 s. Der skalierbare Schaltruck ist durch die Vorgabe des Minimums $a_{x,\text{min}} = -1,2 \text{ m/s}^2$ definiert.

6.2.1 Methodik des Expertentests

Da zu dem neu entwickelten Vorwarnkonzept mittels Rückschaltvorgängen bislang keine Erkenntnisse vorliegen, bietet sich zur Evaluation ein qualitativer Expertentest im Realfahrzeug an, der in der frühen Entwicklungsphase problemstellungsspezifisches Wissen generieren kann (vgl. [9, 20]). Experten definieren sich dabei als erfahren in der Entwicklung und im Umgang mit längsdynamischen Fahrerassistenzsystemen und sind in der vorliegenden Arbeit ausnahmslos in den entsprechenden Entwicklungsabteilungen der BMW Group tätig (Stichprobe $N = 10$). Der Gültigkeit eines Expertentests liegt die These zugrunde, dass diese die nachgestellte Prüfsituation auf den realen Straßenverkehr und unterschiedliche Fahrertypen übertragen können.

Die zu beantwortende Fragestellung im Rahmen des Tests lautet: Wie sieht eine optimale Vorwarnung für ein Gefahrenbremssystem aus? Dazu wird auf einem abgesperrten Gelände ein Prüfzenario aufgebaut. Dieses ergibt sich aus den beiden Fällen, mit denen eine Vorwarnung bei hohen Differenzgeschwindigkeiten konfrontiert sein kann: die tatsächliche Warnung eines abgelenkten Fahrers in einer Auffahrsituation sowie die ungerechtfertigte Warnung eines überholenden Fahrers. Es wird also eine zweispurige Straße nachgebildet, die seitlich durch Pylone begrenzt ist. Die eigene Spur ist durch ein potentielles Kollisionsobjekt belegt, die linke Nachbarspur ist zur Durchführung eines Überholmanövers frei.

Um die absoluten Geschwindigkeiten zu begrenzen, wird ein statisches Szenario, also ein stehendes Hindernis, gewählt. Dieses wird durch Schaumstoffwürfel dargestellt, die mit der maßstabsgetreuen Heckansicht eines Fahrzeugs bedruckt sind. Auf diese Weise lässt sich

eine subjektiv als kritisch wahrgenommene Situation bei gleichzeitig effektiv niedrigem Gefährdungspotential realisieren.

Um die Auffahrsituation zu provozieren, werden die Versuchsteilnehmer angehalten, auf 60 km/h bis 70 km/h zu beschleunigen und sich dem Hindernis mit konstanter Geschwindigkeit anzunähern. Pro untersuchte Vorwarnungsvariante werden sowohl die Ablenkungs- als auch die Überholsituation geprüft. In beiden Fällen ist die entsprechende Warnung abzuwarten, bevor im ersten Fall mit einem selbständigen Bremsen und im zweiten mit einem Überholmanöver reagiert wird. In jedem Fall gilt die Vorgabe einer kollisionsfreien Fahrt.

Die Auslösung der jeweiligen Warnung erfolgt 1,0s vor Erreichen des letztmöglichen Bremszeitpunkts. Dies geht mit der Annahme konform, dass die Eintrittshäufigkeit einer Falschwarnung konstant ist und das Risiko vor allem durch Senkung ihres Schadens reduziert werden muss (vgl. Abschnitt 1.3). Alle Experten erleben im Sinne einer Breiten-evaluation alle vier möglichen Warnungen in identischer Reihenfolge: Optik, Akustik, Haptik (Bremsruck) und Haptik (Schaltruck). Reihenfolgeeffekte können damit nicht ausgeschlossen werden, sind jedoch aufgrund der Transferleistung der Experten zu vernachlässigen, da diese die Varianten bereits im Voraus kennen und nicht in einen Überraschungszustand versetzt werden müssen. Des Weiteren sind Ermüdungseffekte während des kurzen Versuchs ausgeschlossen. Die Fahrer werden vor der jeweiligen Variante kurz über deren Ausprägung informiert und können diese nach eigenem Wunsch mehrfach erleben.

Zur Einschätzung und Bewertung der Varianten werden die Experten gebeten, sich in den entsprechenden Fahrertyp – abgelenkter oder situationsbewusster, überholender Fahrer – hineinzuversetzen und den Einsatzzweck der Warnung zu berücksichtigen. Die Ergebnisse werden pro untersuchte Variante in Fragebögen festgehalten (siehe Anhang B.1). Zusätzlich werden allgemeine Informationen zur Einstellung gegenüber Auffahrwarnungen und Fahrverhalten in einem Vorab- sowie einem Abschlussfragebogen erhoben. Die Auswertung der Daten ist Grundlage für die Ergebnisse im folgenden Abschnitt.

6.2.2 Ergebnisse

Bevor die Ergebnisse detailliert beleuchtet werden, sollen einige Beobachtungen sowie Daten aus den Vorabfragebögen das Probandenfeld kurz vorstellen. Alle zehn Experten wünschen sich zu Beginn des Tests ein System in ihrem Fahrzeug, das sie vor einer drohenden Auffahrkollision warnt. Dazu am besten geeignet scheint ihnen der haptische sowie der auditive Sinneskanal, eine optische Vorwarnung wird weniger präferiert. Die Erfahrung in der Fahrerassistenzentwicklung und die damit verbundene Fahrerfahrung spiegeln sich in der Selbsteinschätzung der Experten wider. Auf einer fünfstufigen Skala von „wenig erfahren (1)“ bis „sehr erfahren (5)“ ergibt sich im Mittel eine Einordnung in Stufe vier. Ihren Fahrstil klassifizieren die Experten zwischen „ruhig/ ausgeglichen (1)“ und „sportlich/ dynamisch (5)“ ebenfalls mit Stufe vier. Vier der Teilnehmer waren in den letzten Monaten mit einer Auffahrsituation konfrontiert, in der ein Warnsystem hilfreich gewesen wäre. Eine Korrelation zu deren Bewertung ist jedoch nicht festzustellen.

Nach jeder Variante sowie jeder untersuchten Situation wird zunächst überprüft, ob eine Warnung wahrgenommen wurde, und wenn ja, in welcher Form. Anhand der Fragebögen

zeigt sich, dass alle Vorwarnungen entsprechend ihrer Ausprägung erkannt wurden, eine valide Bewertung durch die Experten ist damit gewährleistet. Entsprechend der jeweiligen Prüfsituation – Ablenkungs- oder Überholzenario – erfolgt im Anschluss die Bewertung ihrer subjektiven Wirksamkeit sowie ihrer Störung auf einer jeweils fünfstufigen Skala (vgl. Anhang B.1). Abbildung 6.2 stellt die Einordnungen in diese Kategorien einander gegenüber. Gekennzeichnet ist jeweils der arithmetische Mittelwert über alle Fahrer gemeinsam mit den Standardabweichungen σ der beiden Kategorien als Fehlerellipse.

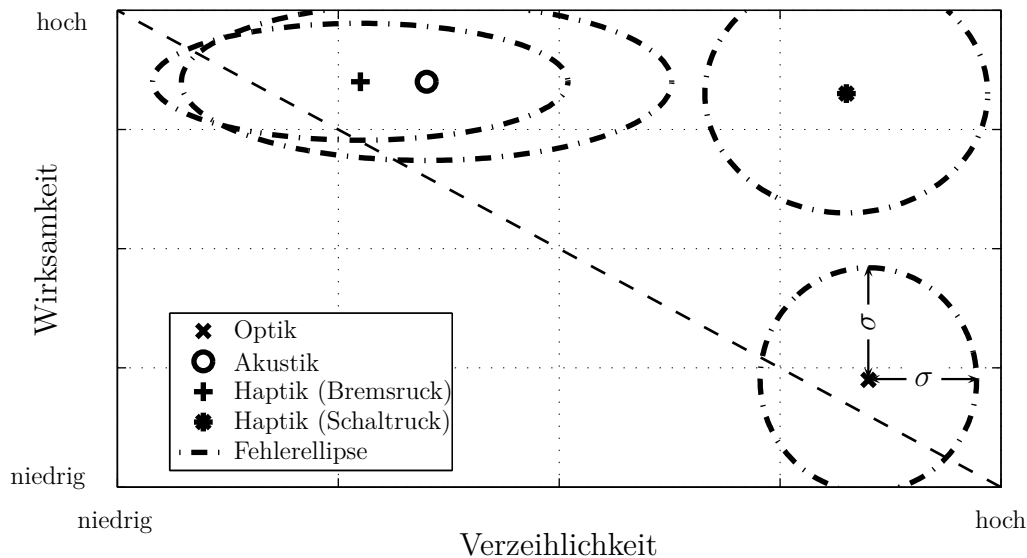


Abbildung 6.2: Einordnung der Vorwarnungsvarianten bei unabhängiger Bewertung

Bei den bereits bekannten Vorwarnungsvarianten zeigt sich in etwa der Zusammenhang zwischen Wirksamkeit und Verzeihlichkeit analog Abschnitt 2.3. Noch deutlicher wird dieser bei einer direkten Gegenüberstellung der beiden Kategorien, wie sie im Abschlussfragebogen erfolgt. Abbildung 6.3 stellt deren Ergebnisse dar. Die Einordnung entspricht dabei in etwa der einer Probandenstudie mit mehr als 100 Teilnehmern (vgl. [39]). Dies bestätigt die Qualität und Validität der Bewertung durch die gewählten Experten. In beiden Abbildungen wird deutlich, dass das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Warnkonzept basierend auf einem skalierbaren Schaltruck das bestehende Warndilemma aus abnehmender Wirksamkeit mit gleichzeitig zunehmender Verzeihlichkeit größtenteils auflösen kann. Während das Wirksamkeitsniveau im Vergleich zu einer akustischen Warnung aufrechterhalten bleibt, erhöht sich die Verzeihlichkeit bei direkter Gegenüberstellung um 80%. Gemäß Definition sinkt das Falschwarnrisiko damit um ebendiesen Prozentsatz. Bei ebenfalls annähernd gleicher Wirksamkeit, wird die Verzeihlichkeit im Vergleich zum Bremsruck sogar mehr als verdoppelt. Um mögliche Schwankungen der subjektiven Bewertung zu kompensieren, wird von einer **Reduktion des Falschwarnrisikos von >50%** ausgegangen.

Während die Wirksamkeit bislang rein subjektiv eingeordnet ist, lässt sie sich mithilfe des so genannten Informationsgehalts einer Warnung differenzierter bewerten (vgl. [39]). Anhand der Einstufung in die Kategorien „aufmerksamkeitserregend“, „hinweisend auf die

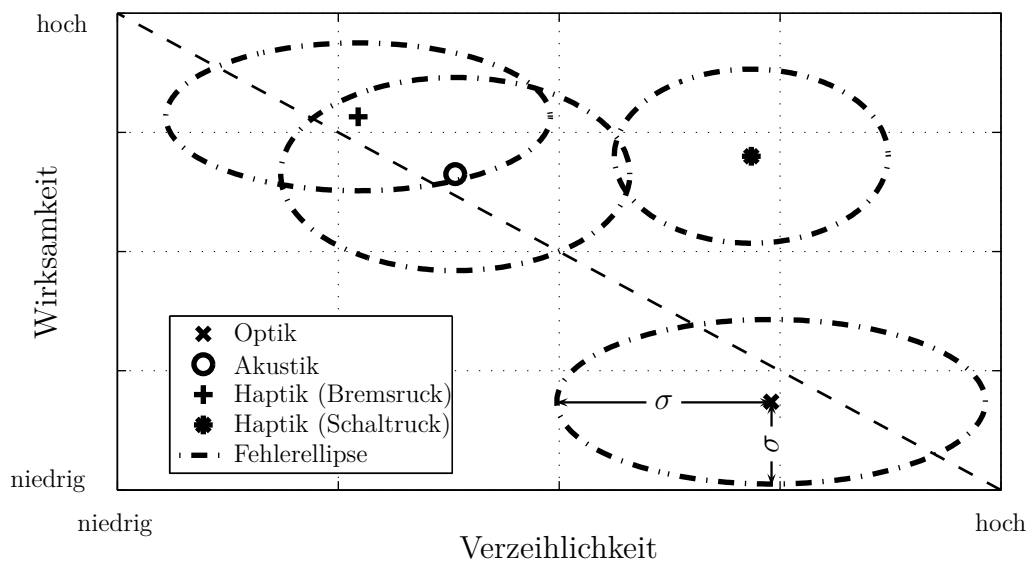


Abbildung 6.3: Einordnung der Vorwarnungsvarianten bei direkter Gegenüberstellung

Situation“ und „hinweisend auf die Aktion“ wird angegeben, wie viel Information mit der Warnung übertragen wird. Für den skalierbaren Schaltruck wird demnach überprüft, ob die Verbesserung der Verzeihlichkeit zulasten des Informationsgehalts geht. Abbildung 6.4 zeigt die Einstufung der überprüften Varianten durch die Experten in die genannten Kategorien auf. Verwendet wird dazu ein so genannter Boxplot, der den Median (symbolisch gekennzeichnet durch \odot), die mittleren 50% (innerhalb des geschlossenen Rechtecks; auch als Interquartilbereich bezeichnet) sowie die Extremwerte darstellt (vgl. [9]). Zusätzlich sind – sofern vorhanden – Ausreißer symbolisch als \circ gekennzeichnet. Dabei zeigt sich, dass die akustische sowie beide haptischen Varianten auf konstant hohem Niveau liegen, mit der erhöhten Verzeihlichkeit also keine Einbußen einhergehen; lediglich die optische Vorwarnung erfährt in allen Kategorien eine niedrigere Einstufung.

Abbildung 6.5 zeigt die abschließende Priorisierung der erlebten Vorwarnungen, wobei Platz eins die am stärksten favorisierte Variante bezeichnet. Die Bewertung der vorangegangenen Abbildungen bestätigt sich hier in der Einordnung des Warnkonzepts basierend auf Schaltvorgängen. Sieben der Experten stufen es mit der besten Platzierung ein. Dies spiegelt sich auch in der Abschlussfrage nach der optimalen Ausprägung einer Vorwarnung für ein Gefahrenbremssystem wider: Ausnahmslos wird der Schaltruck – teils in Kombination mit einer optischen Vorwarnung – genannt.

6.3 Reduzierung des Falschauslöserisikos

Wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Abschaltung des Gefahrenbremssystems durch den Fahrer als Konsequenz von Falschauslösungen angenommen. Wird dieses Schadensausmaß als konstant betrachtet, ist der Stellhebel zur

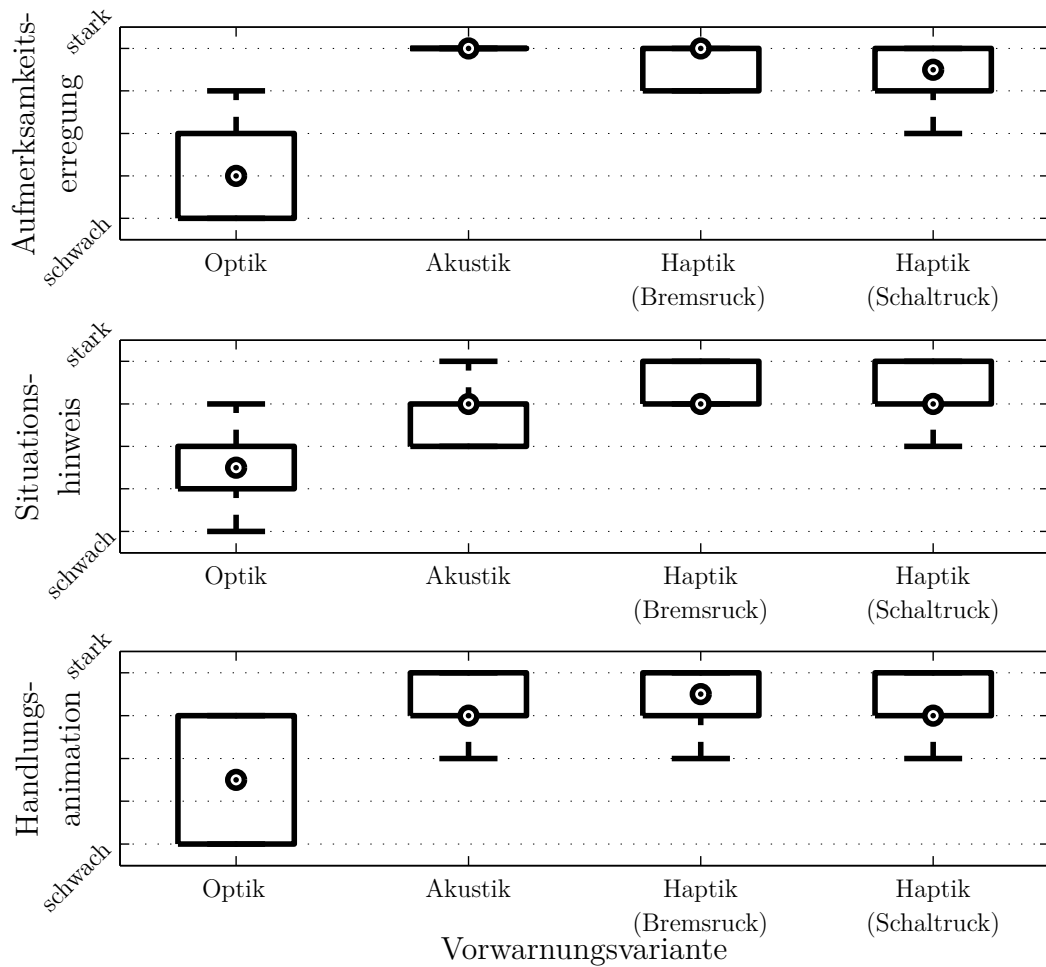


Abbildung 6.4: Differenzierte Bewertung des Informationsgehalts

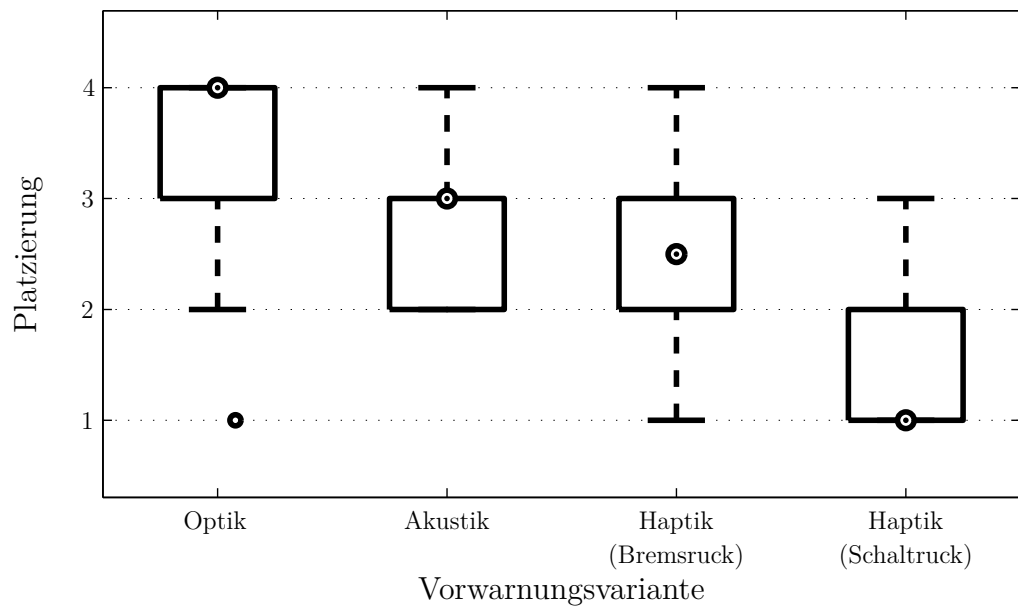


Abbildung 6.5: Priorisierung der Vorwarnungsvarianten

Reduktion des Falschauslöserisikos die Verringerung der Eintrittshäufigkeit einer unge-rechtfertigten Bremsung bei hohen Differenzgeschwindigkeiten. Analog zum vorangegan-genen Abschnitt, darf diese Verbesserung nicht durch einen vollständigen Verzicht auf die Wirksamkeit im Nutzenfall erfolgen. Dies würde bedeuten, dass eine Bremsung stets zum Point of no Return erfolgt und damit im Bereich hoher Differenzgeschwindigkeiten ledig-lich Kollisionsfolgenminderung erreichen könnte. Ziel ist also ein Kompromiss aus Auffahr-und Falschauslöserisiko-Reduktion, der durch das in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Vorge-hen (Berücksichtigung der Fahrerreaktion) erreicht werden soll. Als Vergleichsgröße dient ein Kollisionsvermeidungssystem, das seine Bremsung stets zum letztmöglichen Brems-zeitpunkt initiiert und damit das Auffahrerisiko auch bei hohen Differenzgeschwindigkeiten durch Bremsen zu minimieren versucht.

6.3.1 Methodik der quantitativen Analyse

Zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit unterschiedlicher Zustände eignet sich deren quan-titative Auswertung über eine repräsentative Grundgesamtheit (vgl. [5]). Da die entwickel-te Eingriffsstrategie im Fahrzeug umgesetzt ist, bietet sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Überprüfung der Anzahl auftretender Falschauslösungen im realen Straßenver-kehr an. Eine gefahrlose Durchführung kann in diesem Fall nichtsdestotrotz gewährleistet werden, da die potentielle Bremsung nicht tatsächlich aktiviert und ihr Auftreten nur sta-tistisch gezählt wird.

Messdaten zur Auswertung stehen von circa 1000 gefahrenen Kilometern¹⁰ zur Verfü-gung. Diese teilen sich in 15% innerstädtischen, 25% Landstraßen- und 60% Autobahn-Anteil auf. Enthalten sind darin alle Fremdfahrzeuge im Erfassungsbereich der verbau-ten Sensoren sowie die messbaren Interaktionen von Fahrer und Fahrzeug (vgl. Abschnitt 5.1.1). Im Gegensatz zu einer simulativen Auswertung sind damit alle drei Komponenten Fahrer-Fahrzeug-Umwelt real. Entsprechend resultiert aus den circa 14 Fahrstunden eine Vielzahl unterschiedlicher Konstellationen.

Ziel während der Messdatenaufzeichnung war die Beibehaltung der Wunschgeschwindig-keit: 140 km/h auf Autobahnen, 100 km/h auf Landstraßen und 60 km/h innerorts, respektive weniger bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung. In Interaktion mit den umgebenden Ver-kehrsteilnehmern entstanden dadurch eine Vielzahl von Annäherungs- und Überholvorgän-gen, die die Basis für die Auswertung möglicher Falschauslösungen darstellen.

Da die Messdaten lediglich auf einem Fahrer beruhen (Stichprobe $N = 1$), müssen dessen Fahrerfahrung und -stil qualifiziert werden, um die Ergebnisse plausibel auf eine größere Allgemeinheit transferieren zu können. Ausgewertet werden dazu die Ausscherzeitlücken zu einem vorausfahrenden Fahrzeug bei Ansetzen zu einem Überholvorgang sowie die durch-schnittlichen Folgezeitlücken, also der zeitliche Abstand während einer unbeschleunigten Folgefahrt. Abbildung 6.6 stellt beide als Boxplots dar.

¹⁰Die Messung wurde jeweils nur in den relevanten Szenarien aktiviert. Die tatsächliche Messdatengrund-lage beträgt daher 774,247 km. Da die Nennung von Falschauslösungen pro 1000 km jedoch eine gängige Größe darstellt, wird zur Aufrechterhaltung ganzzahliger Ergebnisse ebendiese Kilometerzahl zugrunde gelegt.

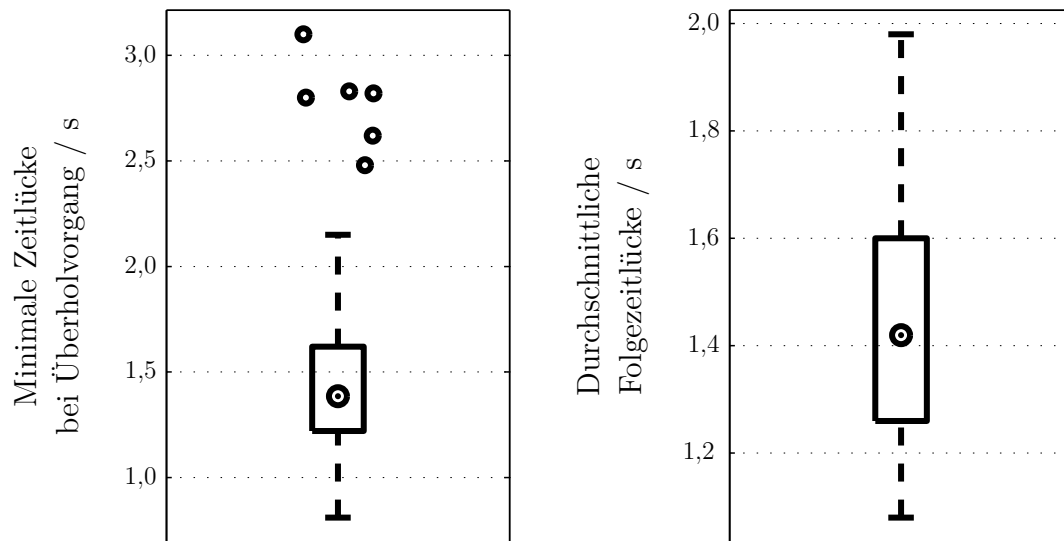


Abbildung 6.6: Verteilung der minimalen Zeitlücke bei einem Überholvorgang und durchschnittlichen Zeitlücke während einer Folgefahrt

Ehmanns teilt die unterschiedlichen Ausscherzeitlücken bei einem Überholvorgang nach der Fahrerfahrung des Probanden ein. Dabei gelten Fahrer mit einer bisherigen Fahrleistung von 10000 km als Fahranfänger, bis 100000 km als unerfahren und ab 100000 km als erfahren. Letztere zeigen beim Ausscheren minimale Zeitlücken von unterhalb 1,0 s und maximale Zeitlücken im Bereich von 3,0 s (vgl. [21]). Dies entspricht weitgehend dem Verhalten des in dieser Arbeit zugrundeliegenden Fahrers, wie es im linken Boxplot in Abbildung 6.6 dargestellt ist. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse auf erfahrene Fahrer ist damit gegeben.

Des Weiteren ist die Einordnung des Fahrers innerhalb der Gruppe erfahrener Fahrzeugführer und damit sein Fahrstil zu qualifizieren. Dazu geeignet ist das Abstandsverhalten im Folgeverkehr, dargestellt im rechten Boxplot in Abbildung 6.6 als durchschnittliche Folgezeitlücke. Vor allem im Rahmen der ACC-Entwicklung war und ist diese Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (vgl. [23, 97]). Die unterschiedlichen Studien resultieren dabei in einem Streuband der ermittelten Durchschnittswerte von 1,1 s bis 1,7 s, mit einer Häufung im Bereich von 1,4 s. Dies entspricht in etwa dem Median des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Fahrers. Das zugrundeliegende Abstandsverhalten als Teil seines Fahrverhaltens sticht also weder durch einen sehr sportlichen, noch durch einen sehr ruhigen Stil hervor, sondern bildet den Durchschnitt bisheriger Aufzeichnungen gut ab; die Aussagekraft der Ergebnisse ist entsprechend hoch.

6.3.2 Ergebnisse

Während der aufgezeichneten Fahrt entstand keine subjektiv kritische Situation und demzufolge keine Auffahrkollision. Die Messdaten erlauben somit keine Aussage über die Wirksamkeit des zugrundeliegenden Kollisionsvermeidungssystems im Nutzenfall zur Minimierung des Auffahrtrisikos. Diese wurde jedoch bereits im Rahmen einer vorangegangenen

Arbeit nachgewiesen (vgl. [66]). Vielmehr ist die Datengrundlage dazu geeignet, trotzdem auftretende Bremsungen als subjektive Falschauslösungen zu quantifizieren und zu bewerten.

Da die Messfahrt kollisionsfrei ist, befinden sich die Falschauslösungen im Spannungsfeld zwischen letztmöglichem Brems- und Ausweichzeitpunkt (Eingriffsdilemma). Dieses wird nur erreicht, sofern bei hohen Differenzgeschwindigkeiten eine Spurwechselmöglichkeit vorliegt. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, versucht das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Eingriffskonzept in diesem Fall, das Falschauslöserisiko durch Berücksichtigung der Fahrerreaktion zu reduzieren.

Tabelle 6.1 zeigt die Anzahl der Falschauslösungen pro 1000 km ohne und mit risikoadaptiver Eingriffsstrategie. Auf Basis der vorliegenden Messdaten wird eine **Reduktion des Falschauslöserisikos von 90%** erreicht. Wie sich die aufgelösten Situationen aus Reaktionsauslöser, Reaktionszeit und Reaktion zusammensetzen und welche unterschiedlichen Fälle sich im Sinne der Fallunterscheidung (vgl. Abschnitt 4.2.1) ergeben, wird im Folgenden detailliert erläutert.

Tabelle 6.1: Anzahl von Falschauslösungen während der Messfahrt (1000 km)

	Kollisionsvermeidungssystem	Kollisionsvermeidungssystem mit risikoadaptiver Eingriffsstrategie
Anzahl Falschauslösungen	10	1

Während der 1000 km Messdatenaufzeichnung traten alle potentiellen Anwendungsfälle eines Gefahrenbremssystems auf: circa 450 kontinuierliche Annäherungen, 200 plötzliche Bremsungen des vorausfahrenden Fahrzeugs sowie 50 knappe Einschermanöver eines Nachbarfahrzeugs, die der Fahrer im Normalfall alle durch eine adäquate Reaktion entschärft; ein Eingriff ist dann auch bei vermeintlich nahem Auffahren nicht nötig. Acht der neun vermiedenen Falschauslösungen entsprechen diesem Schema (Fall 1 der Fallunterscheidung). Abbildung 6.7 zeigt beispielhaft ein Szenario auf: Dargestellt sind im oberen Plot die letztöglichen Zeitpunkte für ein Brems- und Ausweichmanöver, die TTC und das Reaktionszeitende sowie der gemäß der Strategie gewählte Eingriffszeitpunkt. Eine Bremsung wird initiiert, wenn die TTC letzteren unterschreitet; bei einem reinen Kollisionsvermeidungssystem hingegen bei Unterschreiten des letztöglichen Bremszeitpunkts. Im unteren Plot sind zusätzlich die relevanten Reaktionsindikatoren abgebildet.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird das Ereignis „kontinuierliche Annäherung“ bei Unterschreiten von $t_{tc} = 5,0$ s erkannt. Das Ende der Reaktionszeit wird als Schwelle in etwa bei $t_{tc} = 3,2$ s eingetragen. Aus Übersichtlichkeitsgründen wird auf eine Darstellung dieser Schwelle verzichtet, sobald sie von der TTC unterschritten ist. Zu diesem Zeitpunkt endet die maximal angenommene Reaktionszeit. Gemäß den Überlegungen zu Fall 1 wird der Eingriffszeitpunkt zunächst auf den letztöglichen Bremszeitpunkt gelegt, da dem Fahrer genügend

Zeit zur Reaktion verbleibt. Entsprechend dieser These wird auch in der vorliegenden Situation eine Fahrerreaktion erkannt, bevor das Reaktionszeitende erreicht ist. Zunächst weist der Reaktionsindikator Überholwunsch (basierend auf der Erkennung der Fahrpedalstellung gekoppelt mit der aktuellen TTC) auf ein baldiges Überholmanöver hin. Kurz darauf wird dieses durch einen abnehmenden lateralen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sichtbar. Mit der erkannten Reaktion wird der Eingriffszeitpunkt auf den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt verschoben; ein ungestörtes Überholen wird dadurch möglich, obwohl der letztmögliche Bremszeitpunkt im Laufe der Annäherung noch unterschritten wird.

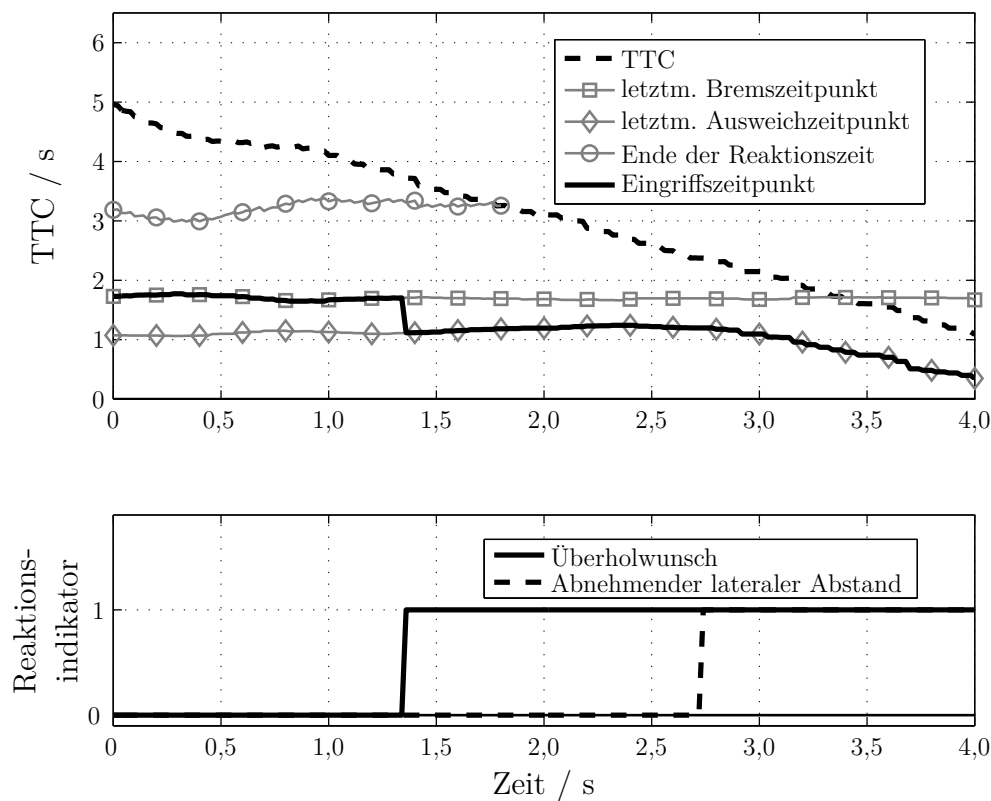


Abbildung 6.7: Relevante Zeitpunkte und Reaktionen während einer kontinuierlichen Annäherung (Fall 1)

Die letzte vermiedene Falschauslösung ist auf den zweiten Fall der Fallunterscheidung zurückzuführen. In Abbildung 6.8 sind dazu erneut die relevanten Zeitpunkte und -verläufe dargestellt. Bei $t = 0$ wird das Ereignis „plötzliche Bremsung“ erkannt. Das Reaktionszeitende liegt zwischen den beiden letztmöglichen Zeitpunkten für Bremsen und Ausweichen. Gemäß der Strategie wird bis zu diesem Zeitpunkt gewartet, bis ein Eingriff erfolgt; der Eingriffszeitpunkt liegt daher deckungsgleich mit dem Ende der Reaktionszeit¹¹. Im vorliegenden Fall wird die Situation schließlich nicht durch den Fahrer des Egofahrzeugs, sondern durch den Fremdfahrzeugfahrer entschärft, indem er sich aus dem Frontbereich des Egofahrzeugs entfernt. Aus diesem Grund sind keine Reaktionsindikatoren dargestellt.

¹¹Der gezackte Verlauf resultiert aus unterschiedlichen Abtastzeiten des Systems sowie der Umfelderkennung.

Die abwartende Strategie in Fall 2 hat damit die potentielle Falschauslösung vermieden, obwohl der letztmögliche Bremszeitpunkt unterschritten wurde.

Der Verzicht auf eine Bremsung zum physikalisch letztmöglichen Bremszeitpunkt hat jedoch Auswirkungen auf den potentiellen Nutzenfall. Wäre auch beim Fremdfahrzeugfahrer keine Reaktion erfolgt, hätte die einsetzende Bremsung nur noch kollisionsfolgenmindernde Wirkung gezeigt – allerdings mehr als bei einer Bremsung zum Point of no Return. Auf Basis der vorliegenden Messdaten ist dies jedoch nur in $\frac{1}{9}$ der relevanten Szenarien der Fall – der Verzicht auf eine kollisionsvermeidende Bremsung ist also entsprechend dem Ziel der Arbeit gering.

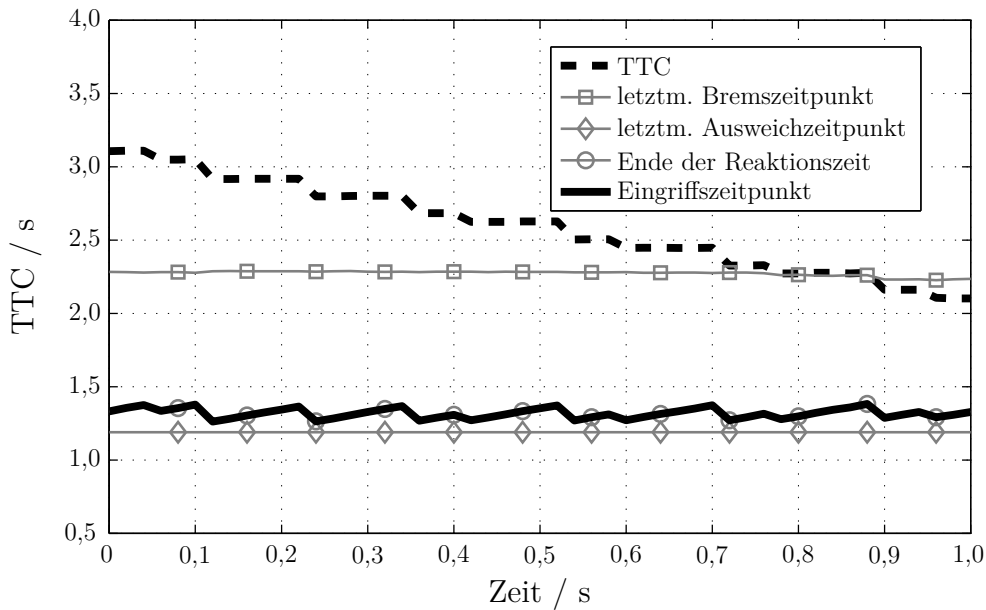


Abbildung 6.8: Relevante Zeitpunkte während einer plötzlichen Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs (Fall 2)

Die verbleibende Falschauslösung, die auch mithilfe der risikoadaptiven Eingriffsstrategie nicht aufzulösen war, entstand durch ein Auffahren bis unter den letztmöglichen Ausweichzeitpunkt. Physikalisch ist dies möglich, da letzterer auf der Annahme einer mittleren Querschleunigung $\bar{a}_y = 3,5 \text{ m/s}^2$ beruht (vgl. Abschnitt 3.2.1), die in seltenen Konstellationen überschritten werden kann. Die einsetzende Bremsung war jedoch nur für wenige Sekundenbruchteile aktiv und hätte nur geringe Auswirkungen auf den Fahrer gezeigt. Nichtsdestotrotz kann die Möglichkeit einer Adaption des letztmöglichen Ausweichzeitpunkts an das individuelle Fahrerverhalten diskutiert werden.

6.4 Reduzierung des Folgekollisionsrisikos

Verglichen mit der Evaluation des Falschwarn- und -auslöserisikos in den vorangegangenen Abschnitten existieren bei der Quantifizierung des Folgekollisionsrisikos einige Unterschiede. Zum einen sind beide Elemente des Risikos – also das Schadensausmaß sowie

die Eintrittshäufigkeit einer Folgekollision – beeinflussbar und messbar. Ersteres ist gemäß Abschnitt 1.3 als direkt proportional zur Rest-Relativgeschwindigkeit im Kollisionsfall definiert; letztere ergibt sich quantitativ aus der Menge aller untersuchten Szenarien mit wechselnder Anzahl an Folgefahrzeugen und unterschiedlichen Ausgangsparametern.

Der zweite Unterschied bedingt sich durch die mehrstufige Untersuchungsmethodik, die der Evaluation zugrundeliegt. Zunächst muss ermittelt werden, ob sich das in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte degressive Bremsprofil wie angestrebt auf das Verzögerungsverhalten des Folgefahrers im Sinne einer verkürzten Reaktionszeit sowie adäquaten Bremsstärke niederschlägt. Als Vergleichsgrößen dienen dabei eine Bremsung mit konstanter Verzögerung sowie ein progressives Bremsprofil, das im Unterschied zur degressiven Bremsung erst leicht und anschließend stärker verzögert (analog den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Seriensystemen). Die mithilfe einer Fahrsimulatorstudie gewonnenen Ergebnisse werden im zweiten Schritt in das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS übernommen und dienen dort der Auswertung einer Vielzahl möglicher Folgeverkehrssituationen. Aus den simulativen Ergebnissen resultieren sowohl die verbleibenden Aufprallgeschwindigkeiten sowie die Häufigkeit einer Folgekollision über alle untersuchten Szenarien – das Folgekollisionsrisiko ist damit quantifizierbar.

6.4.1 Effekt der adaptierten Bremsstärke auf den Folgeverkehr

Wie bereits beschrieben, wird zur Beurteilung des Effekts des degressiven Bremsprofils auf den Folgeverkehr eine Fahrsimulatorstudie durchgeführt¹². Im Gegensatz zum Expertentest sind die Probanden dabei unvoreingenommen und reagieren eher gemäß ihrem normalen Fahrverhalten. Etwaige Unterschiede bei den untersuchten Bremsprofilen resultieren demnach aus der bewusst oder unbewusst wahrgenommenen Aufforderung, die durch das degressive Verzögern ausgesprochen wird. Die zu beantwortende Fragestellung lautet also: Wie verändert sich das Verzögerungsverhalten des Folgeverkehrs bei unterschiedlichen Bremsprofilen?

Methodik der Fahrsimulatorstudie

Zur Durchführung der Fahrsimulatorstudie findet ein Perspektivenwechsel statt: Der Proband befindet sich nicht im mit einem Gefahrenbremssystem ausgestatteten Fahrzeug, sondern stellt den Folgeverkehr dar. Einzelne Fahrzeuge führen während der Studie in definiertem Abstand vor dem Probanden die unterschiedlichen Bremsprofile aus. Das Folgefahrerverhalten ist demnach direkt über die in der Sitzkiste angebrachte Sensorik messbar. Da sich dieses in Abhängigkeit des Ausgangsabstands der beiden Fahrzeuge zu Beginn der Bremsung unterscheiden kann, wird die Untersuchung bei zwei verschiedenen Zeitlücken durchgeführt. Verwendet wird dazu ein Messwiederholungsdesign mit dem Innersubjektfaktor Bremsvariante und dem Zwischensubjektfaktor Zeitlücke. Das heißt, ein Proband erlebt alle drei Bremsprofile bei nur einer Zeitlücke; letztere wird gruppenweise variiert.

¹²Inhalte dieses Abschnitts entstanden teilweise im Rahmen der betreuten Abschlussarbeit von Facius.

Die Gruppenzuordnung erfolgt abwechselnd zur kürzeren und zur längeren Zeitlücke, sodass jeder Gruppe eine gleiche Anzahl an Probanden angehört. Innerhalb der Gruppe wird die Reihenfolge der Bremsvarianten permutiert, um mögliche Reihenfolgeeffekte herauszumitteln (vgl. [6]). Dies ist notwendig, da vor allem bei der Untersuchung von Reaktionszeiten systematische Effekte auftreten. So ist die erste Bremsreaktionszeit in einer Serie aufeinander folgender Bremssituationen statistisch die längste (vgl. [60]).

Das Szenario ist als dreispuriger Autobahnrundkurs gestaltet, der teilweise durch eine zweispurige Baustelle mit Geschwindigkeitsbegrenzung unterbrochen wird. Um das Probandenfahrzeug herum bewegen sich Verkehrsteilnehmer, die nach einem vorgegebenen Fahrermodell mit den übrigen Fahrzeugen interagieren. Drei dieser Fremdfahrzeuge regeln im Laufe der Versuchsdurchführung (circa 45 Minuten) die definierte Zeitlücke zum Probanden ein und initiieren das jeweilige Bremsprofil. Um die Erkennbarkeit der Situation für den Versuchsteilnehmer zu verringern, werden für die Entstehung der Bremsung vier Varianten entworfen, die zufällig variiert werden:

- Das Fremdfahrzeug befindet sich vor dem Probanden und regelt die Zeitlücke auf derselben Fahrspur ein.
- Das Fremdfahrzeug befindet sich vor dem Probanden, regelt auf der Nachbarspur die Zeitlücke ein und schert vor ihm auf seine Fahrspur.
- Das Fremdfahrzeug überholt den Probanden, schert vor ihm auf seine Fahrspur und regelt dort die Zeitlücke ein.
- Das Fremdfahrzeug überholt den Probanden, regelt auf der Nachbarspur die Zeitlücke ein und schert vor ihm auf seine Fahrspur.

Neben der eigentlichen Messfahrt füllen die Versuchsteilnehmer zu Beginn einen demographischen sowie am Ende einen Abschluss-Fragebogen aus (siehe Anhang B.2). Ersterer dient der Erfassung persönlicher Daten und Informationen zum Fahrstil und der Fahrerfahrung und ist Grundlage für die Beschreibung der Stichprobe. In letzterem wird der Proband konkret zum Versuchsgegenstand der unterschiedlichen Bremsungen befragt, das heißt, ob und wie diese wahrgenommen wurden.

Parameterbestimmung

Zur korrekten Bestimmung der Versuchsparameter – also der Werte von Geschwindigkeiten und Abstand bei der Bremsauslösung – wird eine so genannte Near Crash-Parametrierung verwendet. In diesem kollisionsnahen Zustand besteht zur Kollisionsvermeidung ein dringender Handlungsbedarf durch den Fahrer (vgl. [49]). Eine adäquate Reaktion kann die Kollisionsgefahr entsprechend mindern, eine mangelnde Handlung hingegen erhöhen oder zur Kollision führen. In jedem Fall wird sichergestellt, dass in dem zugrundeliegenden Versuch die Gefahr für den Probanden eindeutig wahrnehmbar ist.

Mathematisch lässt sich kollisionsnah in Näherung über eine TTC von 1,5 s beschreiben, die den Übergang hin zu einer kritischen Situation angibt (vgl. [65]). Ziel der Parametrierung ist es also, während der Folgebremssituationen möglichst nahe an diesen Wert zu

kommen, ohne ihn zu unterschreiten. Als Ausgangssituation dient dabei ein Autobahnszenario, in dem ein Fahrzeug einem vorausfahrenden in definiertem Abstand mit gleicher Ausgangsgeschwindigkeit folgt. Nachdem das Vorderfahrzeug eine plötzliche Bremsung ausführt, reagiert der Folgefahrzeugfahrer nach seiner Reaktionszeit ebenfalls mit einer Verzögerung. Als einstellbare Parameter stehen die Ausgangsgeschwindigkeit und der Ausgangsabstand sowie die durch das Vorderfahrzeug abgebaute Geschwindigkeit zur Verfügung. In Abhängigkeit der Probandenreaktion ergeben sich außerdem die Reaktionszeit und die Verzögerung des Folgefahrers. Als Bremsprofil des vorausfahrenden Fahrzeugs wird eine degressive Bremsung angenommen.

Um die angestrebte minimale TTC zu erreichen, müssen die Parameter innerhalb ihrer validen Wertebereiche variiert werden. Da es sich um ein Autobahnszenario handelt, wird für die Ausgangsgeschwindigkeit ein Bereich von 110 km/h bis 150 km/h zur Variation genutzt, für den Geschwindigkeitsabbau während der Bremsung ein Bereich zwischen 40 km/h und 80 km/h . Wie in Abschnitt 1.3 bereits beschrieben, bewegen sich häufig beobachtete Zeitlücken im Folgeverkehr zwischen $0,7 \text{ s}$ und $1,1 \text{ s}$. Um auch größere Abstände abzudecken, wird der Variationsbereich für den Ausgangsabstand bis zu einer Zeitlücke von $1,4 \text{ s}$ erweitert.

Für die aus dem Versuch resultierenden Werte der Probandenreaktion werden zur Parametereinstellung Wertebereiche aus der Literatur genutzt. Die Reaktionszeit des Folgefahrers wird entsprechend zwischen $0,5 \text{ s}$ und $2,0 \text{ s}$ variiert (vgl. [11]). Auch Abbildung 3.7 zeigt, dass damit – abhängig vom auslösenden Ereignis – ein Großteil aller Fahrer abgedeckt ist. Als letzter Wert verbleibt die durchschnittliche Bremsstärke des Folgefahrers. Diese wurde in einem Feldversuch in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit untersucht (vgl. [12]). Für die gewählten Geschwindigkeiten ergibt sich in Näherung ein Interquartilbereich von -4 m/s^2 bis -7 m/s^2 , der zur Variation genutzt wird.

Als Ergebnis resultieren für die einstellbaren Werte durch die Parametervariation eine Ausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h , eine durch das Vorderfahrzeug abzubauenende Geschwindigkeit von 60 km/h sowie die zwei Ausgangszeitlücken $0,8 \text{ s}$ (im weiteren Verlauf als kurze Zeitlücke bezeichnet) und $1,3 \text{ s}$ (lange Zeitlücke), bei denen die angestrebte minimale TTC unter Annahme einer bestimmten Reaktion des Folgefahrers in Näherung erreicht wird. Nur wenn die gewünschten Werte (innerhalb eines Toleranzbands) eingehalten sind, wird das jeweilige Bremsprofil durch das vorausfahrende Fahrzeug initiiert.

Mit der Vorgabe der abzubauenen Geschwindigkeitsdifferenz von 60 km/h lassen sich die untersuchten Bremsprofile eindeutig definieren. Um die Vergleichbarkeit zwischen ihnen zu wahren und Unterschiede im Verzögerungsverhalten des Folgeverkehrs allein auf die Ausprägung der Verzögerungsverläufe zurückführen zu können, bauen alle drei Profile die vorgegebene Geschwindigkeit auf derselben Wegstrecke ab. Zusätzlich besitzen sie denselben Schwellzeitgradienten, das heißt, der Auf- und Abbau der Verzögerung geschieht gleich schnell. Abbildung 6.9 stellt die drei Bremsverläufe einander gegenüber. Die Verzögerungsstärken ergeben sich durch die Prämisse, den Geschwindigkeitsabbau nicht nur auf derselben Distanz, sondern auch innerhalb der annähernd gleichen Zeit zu gewährleisten. Des Weiteren stellen sie die eindeutige Erkennbarkeit der Unterschiede im Fahrsimulator sicher.

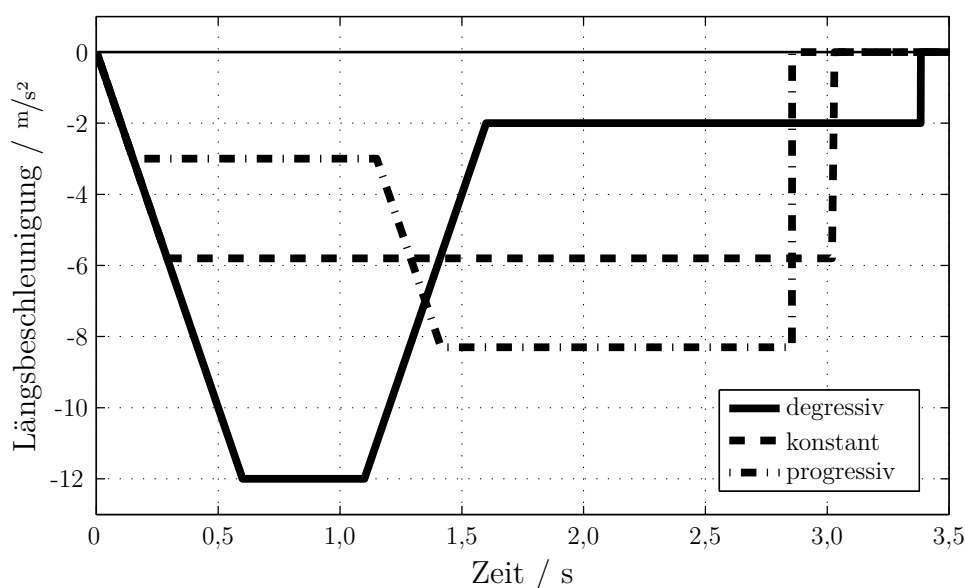


Abbildung 6.9: Gegenüberstellung der untersuchten Bremsprofile

Abhängige Variablen und Hypothesen

Aufgabe einer Probandenstudie ist es, Veränderungen in den untersuchten Werten, den so genannten abhängigen Variablen, auf eine oder mehrere unabhängige Variablen zurückzuführen (vgl. [6]). Letztere sind im vorgestellten Versuch durch die drei unterschiedlichen Bremsprofile sowie die beiden Ausgangszeitlücken gegeben. Die abhängigen Variablen werden im Folgenden vorgestellt. Unterschieden wird dabei in der vorliegenden Arbeit zwischen primären und sekundären Fahrdaten sowie subjektiven Größen. Erstere sind zeitlich vom Beginn der Bremsung des Vorderfahrzeugs bis zum Beginn der Probandenbremsung einzuordnen. Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, haben diese eine sehr hohe Aussagekraft. Sekundäre Fahrdaten hingegen, die zeitlich bis nach der Probandenbremsung reichen, sind aufgrund der fehlenden Dynamik im statischen Simulator eher qualitativ zu bewerten. Unter den subjektiven Größen schließlich sind die aus den Fragebögen erhobenen Daten zu verstehen.

Die wesentlichste und einzige primäre Größe, die im Rahmen der Untersuchung ermittelt werden soll, stellt die Bremsreaktionszeit dar. Sie beinhaltet die Zeitspanne vom Aufleuchten des Bremslichts des vorausfahrenden Fahrzeugs bis hin zum messbaren Einsetzen der Bremsreaktion, also dem Drücken des Bremspedals (vgl. [98]). Jede Verbesserung der Bremsreaktionszeit hätte einen erheblichen Einfluss auf das Kollisionsvermeidungspotential der Eingriffsstrategie. Um die Vergleichbarkeit der gemessenen Zeiten zwischen den Probanden zu gewährleisten, werden nur valide Daten zur Auswertung verwendet. Ausgeschlossen werden dazu Fälle, in denen der Proband bereits bei Erscheinen der Bremsleuchten des Vorderfahrzeugs bremst oder zumindest den Fuß über dem Bremspedal hält (durch Videoaufzeichnung des Fußraums ersichtlich). Des Weiteren werden Fahrer, die auf die drohende Gefahr hin ausweichen und dazu zusätzlich verzögern, nicht in der Auswertung berücksichtigt.

Hypothesen zur Bremsreaktionszeit (1-2)

1. Das degressive Bremsprofil bewirkt die kürzeren Bremsreaktionszeiten im Vergleich zu einem konstanten und progressiven Verlauf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Proband das Vorderfahrzeug schneller näherkommen sieht und eine hohe Dringlichkeit seiner eigenen Handlung erkennt (vgl. Abschnitt 4.2.2).
2. Bei der kurzen Zeitlücke sind die Bremsreaktionszeiten allgemein kürzer, da dem Proband weniger zeitlicher Spielraum für seine Handlung zur Verfügung steht und er die Situation als subjektiv kritischer empfindet.

Auf Seiten der sekundären Fahrdaten werden der maximal erreichte Bremspedalweg in % des maximal möglichen Wegs sowie die verstrichene Zeit bis zu diesem analysiert. Letztere ist als Zeitspanne zwischen dem Aufleuchten des Bremslichts des Vorderfahrzeugs und dem Augenblick des maximalen Bremspedalwegs definiert. Analog der Bremsreaktionszeit existieren auch für diese Faktoren Ausschlusskriterien, die die Vergleichbarkeit der Werte untereinander sicherstellen. Nicht verwendet werden für die statistische Auswertung Probanden, die ausweichen oder in eine Kollision verwickelt sind. Außerdem wird im Falle von zwei erreichten Maxima das erste verwendet.

Hypothesen zum maximal erreichten Bremspedalweg (3-5)

3. Es sind keine Unterschiede in den maximal erreichten Bremspedalwegen feststellbar; das degressive Bremsprofil führt entsprechend nicht zu unangebracht starken Bremsungen des Folgeverkehrs im Vergleich zu den anderen Verzögerungsverläufen. Weitere, in Kolonne fahrende Fahrzeuge werden somit nicht zusätzlich gefährdet.
4. Das degressive Bremsprofil führt jedoch zu kürzeren Zeiten bis zum Erreichen des maximalen Bremspedalwegs. Analog der Bremsreaktionszeit ist dies auf die erhöhte Dringlichkeit der Situationswahrnehmung zurückzuführen.
5. Bei der kurzen Zeitlücke ist die Zeit bis zum Bremspedalwegmaximum allgemein kürzer als bei der langen Zeitlücke, da weniger Zeit für die Fahrerreaktion zur Verfügung steht.

Als weitere sekundäre Größe wird die Anzahl aufgetretener Kollisionen untersucht. Hierbei findet jedoch keine statistische Auswertung, sondern eine rein quantitative Analyse statt. Die Hypothese lautet, dass eine degressive Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs im Vergleich zu einem konstanten oder progressiven Bremsprofil in weniger Kollisionen resultiert.

Qualitativ werden die subjektiven Informationen aus dem Abschluss-Fragebogen ausgewertet. Ziel ist dabei zum einen, zu überprüfen, ob den Probanden der Versuchsgegenstand aufgefallen ist. Zum anderen wird konkret abgefragt, ob und welche Unterschiede in den Bremsungen wahrgenommen wurden. Die Hypothese lautet hierbei, dass der ausgesprochene Bremsreiz unbewusst wirkt.

Ergebnisse

An der Fahrsimulatorstudie nahmen 70 Probanden teil. Vier mussten die Versuchsdurchführung wegen Simulatorübelkeit abbrechen. Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt definierten Ausschlusskriterien stehen jedoch nicht für alle verbleibenden Teilnehmer jeweils alle drei Werte (für jede Bremsvariante) zur Auswertung zur Verfügung. Auch wenn es Verfahren gibt, die fehlenden Werte beispielsweise durch den Durchschnittswert aller anderen zu ersetzen, stellt der listenweise Fallausschluss im Sinne der statistischen Auswertung eine der besten Methoden dar (vgl. [3]). Durch ihn werden Probanden, bei denen nur ein Wert als nicht valide gewertet wird, vollständig gestrichen. In der vorliegenden Untersuchung verbleibt nach Anwendung des listenweisen Fallausschlusses eine Stichprobe $N = 31$, wovon 17 Teilnehmer der kurzen und 14 der langen Zeitlücke zugeordnet sind. Diese Stichprobengröße ist für den Vergleich verschiedener Ausprägungen im Entwicklungsstadium gut geeignet (vgl. [14]).

Die Auswertung der demographischen Fragebögen ermöglicht einen Überblick über die Stichprobe. Das durchschnittliche Alter beträgt 31 Jahre ($\sigma = 9,8$ Jahre), die Verteilung über die verschiedenen Altersgruppen ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Fahrer im Rentenalter nahmen nicht an der Untersuchung teil. 90% der Teilnehmer sind männlich, die verbleibenden 10% weiblich. Die Alters- und Geschlechterverteilung ist damit nicht repräsentativ für die Bevölkerung in Deutschland, wie bei vielen Fahrerassistenzstudien jedoch den gegebenen Rahmenbedingungen geschuldet (vgl. [12]). Eine gleichmäßigere Verteilung ergibt sich bei den durchschnittlichen Fahrleistungen der Teilnehmer: 26% fahren weniger als 5000 km pro Jahr, 16% bis zu 10000 km, 39% bis zu 20000 km und 19% mehr als 20000 km. Mehr als die Hälfte (58%) absolvierte bereits ein Fahrsicherheitstraining und knapp die Hälfte aller Probanden (45%) nahm bereits an einer Fahrsimulatorstudie teil.

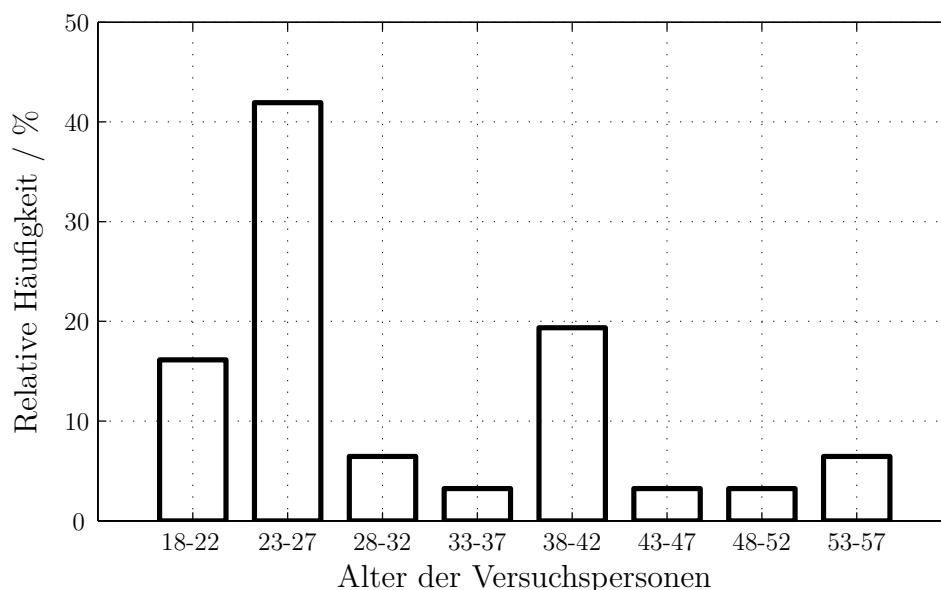


Abbildung 6.10: Übersicht über die Altersverteilung der Versuchspersonen

Statistischer Vergleich der Bremsprofile

Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Verzögerungsverläufen wird eine Varianzanalyse durchgeführt. Dabei werden Hypothesen postuliert, die durch die strichprobenartig erhobenen Messdaten überprüft werden. Getestet wird jeweils die Nullhypothese H_0 (keine signifikanten Unterschiede in der betreffenden Variable) gegen die Alternativhypothese H_1 (signifikante Unterschiede in der betreffenden Variable). Eine Hypothese wird erst dann verworfen, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit p , die Nullhypothese fälschlicherweise zu verwerfen, kleiner als 5% (signifikant), kleiner als 1% (hochsignifikant) oder kleiner als 0,1% ist (höchstsignifikant). Diese Schwellwerte entsprechen dem so genannten Signifikanz- oder Alpha-Fehler-Niveau (vgl. [8]).

Für das zweifaktorielle Versuchsdesign (Bremsvariante und Zeitlücke) mit Wiederholung des Bremsvarianten-Faktors schlagen Vorberg und Blankenberger eine Varianzanalyse nach dem allgemeinen linearen Modell (ALM) mit Messwiederholung vor (vgl. [89]). Um diesen Test durchführen zu können, müssen die Messdaten mehreren Voraussetzungen genügen (vgl. [8, 69]):

- Intervallskaliertheit des Messniveaus,
- homogene Korrelation zwischen den abhängigen Variablen,
- Sphärizität (homogene Korrelation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen),
- homogene Fehlervarianz der abhängigen Variablen und
- Normalverteilung der Messwerte.

Die Voraussetzungen gelten im Allgemeinen als erfüllt, wenn im jeweiligen Voraussetzungs-test ein Signifikanz-Niveau von 20% überschritten und damit die Nullhypothese bestätigt ist (vgl. [8]). Bei teilweiser Nichterfüllung wird für die statistische Auswertung ein nicht-parametrischer Test genutzt, der jedoch auch eine geringere Teststärke aufweist (vgl. [89]).

Abbildung 6.11 stellt die Verteilung der ermittelten Bremsreaktionszeiten dar. Bereits anhand der im Boxplot abgebildeten Kennwerte lässt sich eine Tendenz zu kürzeren Zeiten bei der degressiven Bremsung erkennen. Da die zugrundeliegenden Daten alle oben genannten Voraussetzungen erfüllen, lässt sich das ALM auf die Bremsreaktionszeiten anwenden. Dieses bestätigt die Alternativhypothese, dass signifikante Unterschiede vorliegen. Angegeben wird dazu die Anzahl der Freiheitsgrade des Tests (in diesem Fall zwei Freiheitsgrade zwischen den drei Bremsvarianten degressiv, konstant und progressiv), der F-Wert als Testergebnis sowie die Irrtumswahrscheinlichkeit im Vergleich zum Signifikanz-Niveau:

$$F(\underbrace{2}_{\text{Anzahl Freiheitsgrade}}) = \underbrace{16,498}_{\text{F-Wert}}, \quad \underbrace{p}_{\text{Irrtumswahrscheinlichkeit}} < \underbrace{0,001}_{\text{Signifikanz-Niveau}} \quad (6.1)$$

Zwischen welchen Varianten die Unterschiede existieren, wird durch einen separaten paarweisen Vergleich mithilfe des Bonferroni-Tests ermittelt. Tabelle 6.2 stellt die Ergebnisse hierzu dar. Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen allen Bremsprofilen signifikant, zwischen der degressiven und der progressiven Bremsung sogar höchstsignifikant

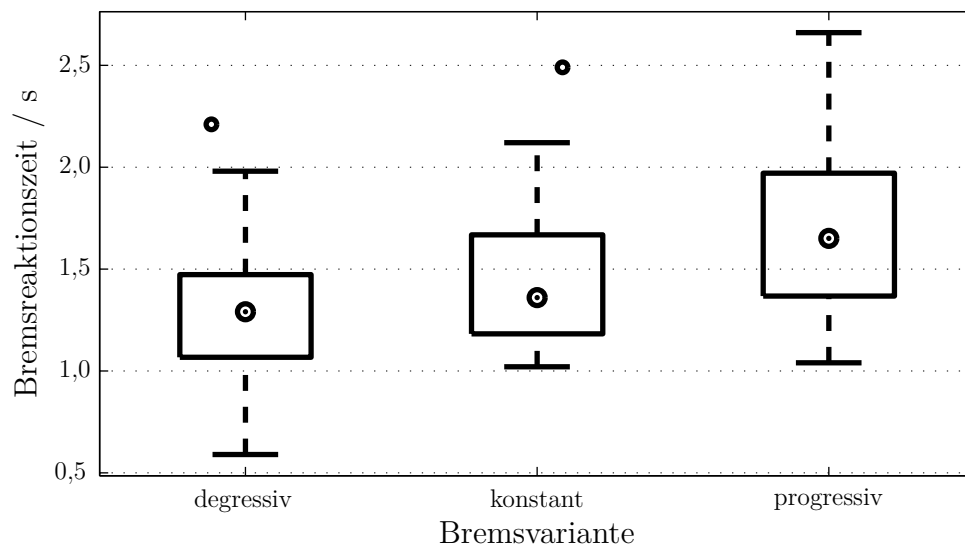


Abbildung 6.11: Gegenüberstellung der Bremsreaktionszeiten der unterschiedlichen Bremsprofile

sind. Die Hypothese 1 lässt sich damit bestätigen. Dass auch der Faktor Zeitlücke Signifikanz aufweist und damit auch die Hypothese 2 zutrifft, bestätigt die Analyse des Zwischensubjektfaktors mit $F(1) = 21,964$, $p < 0,001$. Das bedeutet, dass unabhängig von der Ausgangszeitlücke die neuartige degressive Bremsung beim Folgefahrer die schnellste Reaktion abrufen und damit das Kollisionsvermeidungspotential erheblich steigern kann.

Tabelle 6.2: Paarweise Vergleiche der Bremsreaktionszeiten

Vergleich zwischen		Signifikanz-Niveau
degressiv	konstant	$0,01400 < 0,050$ (signifikant)
degressiv	progressiv	$0,00003 < 0,001$ (höchstsignifikant)
konstant	progressiv	$0,02100 < 0,050$ (signifikant)

Die Verteilung der maximal erreichten Bremspedalwege bei den unterschiedlichen Bremsprofilen ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Da die Voraussetzung homogener Fehlervarianzen verletzt ist, wird zur Auswertung als nicht-parametrischer Test Friedmans einfaktorielle Varianzanalyse nach Rang bei verbundenen Stichproben verwendet (vgl. [89]). Diese muss für den Zwischensubjektfaktor Zeitlücke getrennt durchgeführt werden.

Für die kurze Zeitlücke ergeben sich keine signifikanten Unterschiede ($F(2) = 0,778$, $p > 0,05$), für die lange Zeitlücke zunächst schon ($F(2) = 7,176$, $p < 0,05$). Beim paarweisen Vergleich muss in diesem Fall jedoch eine Anpassung des Signifikanz-Niveaus erfolgen, also eine Division der ursprünglichen 5%-Schwelle durch drei (bei drei paarweisen Vergleichen) (vgl. [8]). Nach der Alpha-Fehler-Korrektur ergeben sich auch bei der langen Zeitlücke keine signifikanten Unterschiede. Die Hypothese 3 kann damit bestätigt werden. Es muss nicht davon ausgegangen werden, dass der Folgeverkehr aufgrund der Ausprägung des

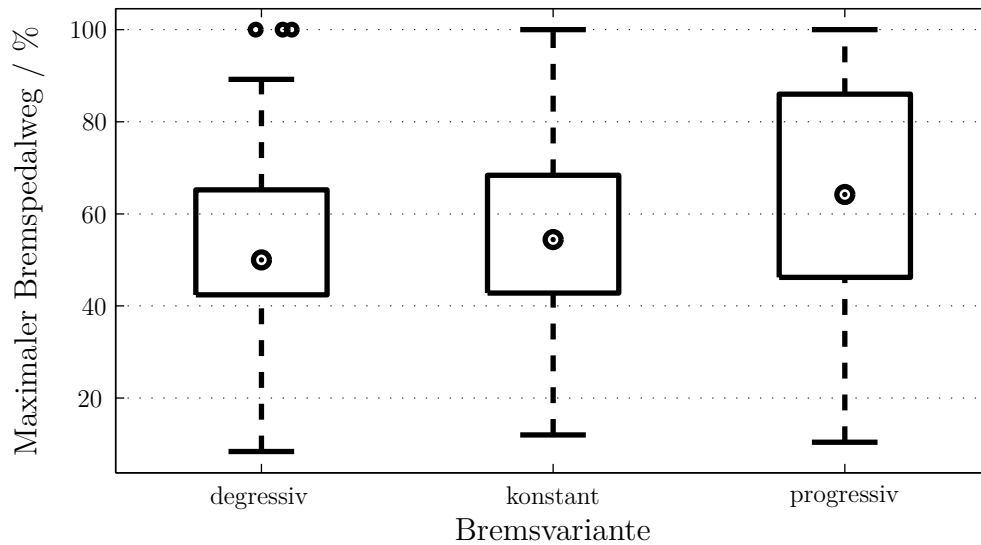


Abbildung 6.12: Gegenüberstellung der maximal erreichten Bremspedalwege der unterschiedlichen Bremsprofile

degressiven Verlaufs unnötig stark verzögert und ihm folgende Verkehrsteilnehmer zu einer noch stärkeren Bremsung zwingt, die Bremsstärke also nach hinten verstärkt.

Im vorangegangenen Abschnitt wird postuliert, dass sich die starke Reaktionsaufforderung des degressiven Bremsprofils auch in der Zeit bis zum Erreichen des maximalen Bremspedalwegs widerspiegelt. Abbildung 6.13 stellt dazu die Verteilungen dar. Analog der Bremsreaktionszeit sind alle Voraussetzungen zur Anwendung des ALM erfüllt. Dessen Ergebnis $F(2) = 16,506$, $p < 0,001$ bestätigt die signifikanten Unterschiede.

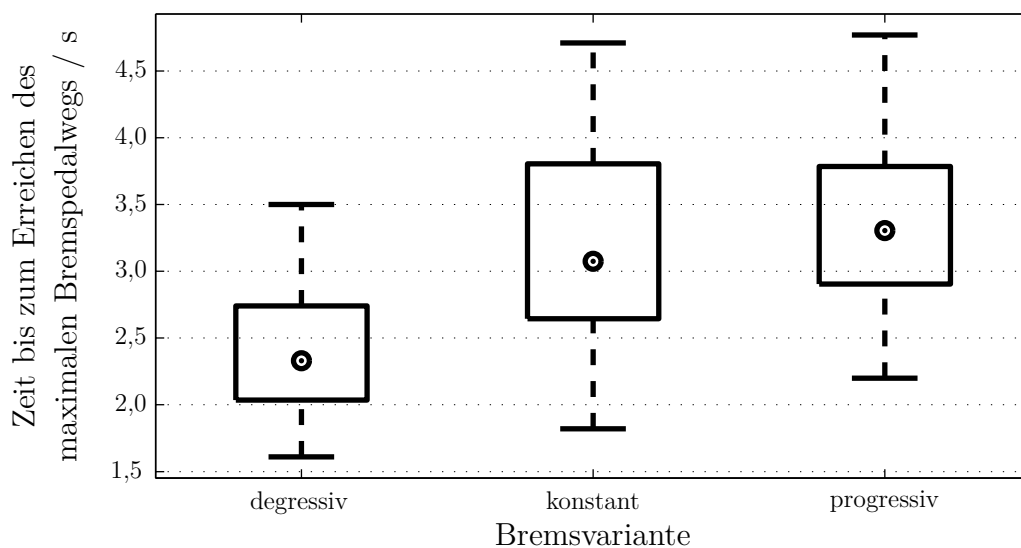


Abbildung 6.13: Gegenüberstellung der Zeiten bis zum Erreichen des maximalen Bremspedalwegs der unterschiedlichen Bremsprofile

Tabelle 6.3 zeigt die paarweisen Vergleiche. Das degressive Bremsprofil unterscheidet sich zu den beiden anderen mindestens hochsignifikant. Hypothese 4 ist somit bestätigt. Lediglich zwischen der progressiven und der konstanten Bremsung existieren keine signifikanten Unterschiede. Die Überprüfung des Zwischensubjektfaktors Zeitlücke ergibt abschließend die Richtigkeit auch der Hypothese 5 – die Zeiten sind bei der kurzen Zeitlücke signifikant kürzer ($F(1) = 6,519$, $p < 0,05$). Es zeigt sich also, dass die in dieser Arbeit vorgestellte Bremsstrategie dem Ziel einer schnellen und adäquaten Bremsung optimal nachkommt und damit die Eintrittshäufigkeit von Folgekollisionen erheblich senken kann.

Tabelle 6.3: Paarweise Vergleiche der Zeiten bis zum maximal erreichten Bremspedalweg

Vergleich zwischen		Signifikanz-Niveau
degressiv	konstant	$0,00100 < 0,010$ (hochsignifikant)
degressiv	progressiv	$0,00002 < 0,001$ (höchstsignifikant)
konstant	progressiv	$0,77900 > 0,050$ (nicht signifikant)

Qualitativ lässt sich zu den sekundären Fahrdaten festhalten, dass sich das Bremsprofil des vorausfahrenden Fahrzeugs oft im Verzögerungsverlauf des Probanden wiederfindet – es wird also „nachgebremst“. Das Maximum der Bremsstärke wird bei der degressiven Bremsung aber signifikant früher erreicht. Dies führt dazu, dass in diesem Fall auch weniger Kollisionen entstehen: drei beim degressiven, vier beim konstanten und neun beim progressiven Bremsprofil.

In etwa der Hälfte aller Probanden war nach der Versuchsdurchführung der Versuchsgegenstand in Form der Bremsung des Vorderfahrzeugs bewusst. Keiner konnte jedoch Unterschiede in den verschiedenen Bremsverläufen ausmachen, weder in der Stärke noch in der leicht unterschiedlichen Dauer. Die trotzdem resultierenden Signifikanzen vor allem bei den Bremsreaktionszeiten machen deutlich, dass die Reaktionsaufforderung eher unbewusst verarbeitet wird.

6.4.2 Auswirkungen auf das Folgekollisionsrisiko

Während die Fahrsimulatorstudie das Potential der risikoadaptiven Eingriffsstrategie mit degressivem Bremsprofil in genau zwei Arbeitspunkten (ein Folgefahrzeug mit einer Ausgangsgeschwindigkeit bei zwei Ausgangszeitlücken) bestätigt, soll im Rahmen der Verkehrssimulation das zugrundeliegende Szenario möglichst vollständig variiert werden. Damit steht eine Datengrundlage zur Verfügung, um sowohl die Eintrittshäufigkeit als auch das Schadensausmaß einer Folgekollision zu quantifizieren. Als Vergleichsgröße wird aufgrund des schlechten Abschneidens der progressiven Bremsung bei den im vorangegangenen Abschnitt ermittelten Werten lediglich eine Konstantbremsung verwendet. Diese beginnt – wie die degressive Bremsung – im Vergleich zum letztmöglichen Bremszeitpunkt um die angenommene Reaktionszeit früher und regelt die zur Kollisionsvermeidung notwendige Verzögerung konstant ein (vgl. Abschnitt 4.2.2). Der Verlauf der degressiven Verzögerung

entspricht im leichten Gegensatz zur Fahrsimulatorstudie exakt dem in Abbildung 4.3 vorgestellten Profil.

Methodik der Verkehrssimulation

Die im Rahmen der Fahrsimulation gewonnenen Ergebnisse müssen zunächst in das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS übernommen werden – allen voran die primären Fahrdaten in Form der Bremsreaktionszeiten. Da diese nur für zwei Zeitlücken vorliegen, wird folgende Annahme getroffen: Zwischen der kurzen (0,8 s) und der langen Zeitlücke (1,3 s) wird der Mittelwert der Reaktionszeiten linear interpoliert und in PELOPS für den jeweiligen Ausgangsabstand hinterlegt. Oberhalb einer Zeitlücke von 1,3 s wird der Wert gesättigt. Das bedeutet, dass das Fahrermodell in Abhängigkeit des Bremsprofils des vorausfahrenden Fahrzeugs und der Ausgangszeitlücke die aus der Fahrsimulatorstudie interpolierten oder gesättigten Reaktionszeiten aufweist.

Des Weiteren muss der Bremsverlauf des PELOPS-Fahrermodells qualitativ mit den Probandenbremsungen verglichen werden. Dazu ist die Auflösung einiger Sicherheitsmechanismen in PELOPS notwendig, die im Falle einer drohenden Kollision die Reaktionszeit gleich null setzen und eine sofortige Vollverzögerung einleiten. Das Fahrermodell selbst zeigt jedoch wie die sekundären Fahrsimulordaten ein verstärktes „Nachbremsen“ des Verzögerungsverlaufs des Vorderfahrzeugs, auch mit schnellerem Erreichen des Maximums bei der degressiven Verzögerung. Es besteht demnach eine hohe Analogie zu den realen Bremsungen, was die Anwendbarkeit der Methodik bestätigt.

Das Szenario besteht aus einer einspurigen Fahrbahn ohne Gegenverkehr und ohne Geschwindigkeitsbegrenzung (siehe Abbildung 6.14). Im Startzustand wird eine definierte Anzahl an Fahrzeugen in gegebenen Abständen und mit gegebenen Startgeschwindigkeiten positioniert. Das erste Fahrzeug in dieser Kolonne entspricht dem Egofahrzeug, das mit einem Gefahrenbremsssystem ausgestattet ist. In einiger Entfernung ist ein stehendes Hindernis positioniert, auf das die Kolonne nach Start der Simulation zufährt und das Egofahrzeug das jeweilige Bremsprofil kollisionsvermeidend ausführt. Nach der vorgegebenen Reaktionszeit reagieren die Folgefahrzeuge entsprechend ihres Fahrermodells. Zu beachten ist dabei, dass die Sicht jedes Folgefahrzeugs per Konfiguration auf sein Vorderfahrzeug beschränkt ist, sie also eine Bremsung des Vorvorderfahrzeugs nicht bemerken.

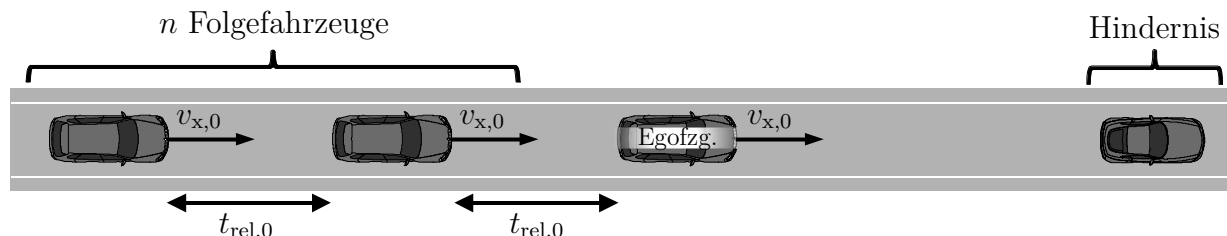


Abbildung 6.14: Aufbau des Verkehrssimulationsszenarios

Durch eine systematische Variation der Ausgangsparameter kann nun die Anzahl der untersuchten Situationen im Vergleich zur Fahrsimulatorstudie drastisch erhöht werden.

Zur Verfügung stehen dazu die Ausgangsgeschwindigkeit $v_{x,0}$, die aufgrund der Bremsung auf ein stehendes Hindernis betragsmäßig der Differenzgeschwindigkeit entspricht, die Ausgangszeitlücke $t_{\text{rel},0}$ sowie die Anzahl an Folgefahrzeugen n . Für die Geschwindigkeit wird ein Variationsbereich von 10 km/h bis 110 km/h mit einer Diskretisierung von 10 km/h-Schritten gewählt. Damit sind auch sehr hohe Differenzgeschwindigkeiten abgebildet. Für die Ausgangszeitlücke wird der Bereich der Fahrsimulatorstudie von 0,8 s auf bis zu 2,0 s erweitert (in Schritten von 0,1 s). Die Anzahl der Folgefahrzeuge wird in Einer-Schritten zwischen eins und sieben variiert. Es resultieren damit 1001 verschiedene Ausgangssituationen.

Als Auswertungsgrößen werden die Anzahl an Kollisionen sowie für den Kollisionsfall die verbleibenden Relativgeschwindigkeiten erfasst. Zu beachten ist dabei, dass in einem Szenario stets nur die erste Kollision und deren Geschwindigkeiten betrachtet werden. Das heißt, dass bei der quantitativen Zählung aus einer Folgeverkehrskonstellation nur eine Kollision resultieren kann und auch aus den Kollisionsgeschwindigkeiten keine Durchschnittswerte gebildet werden.

Ergebnisse

Da das zugrundeliegende Szenario durch die Parametervariation auch viele kritische Situationen mit hohen Differenzgeschwindigkeiten, kleinen Abständen und vielen Folgefahrzeugen aufweist, kam es während der Simulationsdurchläufe zu einer Vielzahl von Kollisionen (siehe Tabelle 6.4). Dies bestätigt die korrekte Parameterwahl zur Analyse von kollisionsnahen Konstellationen. Durch den Einsatz der in dieser Arbeit vorgestellten risikoadaptiven Eingriffsstrategie mit ihrer degressiven Bremsung konnte jedoch rein quantitativ die Eintrittshäufigkeit von Folgekollisionen – und damit das erste Element des Folgekollisionsrisikos – um 33% gesenkt werden.

Tabelle 6.4: Anzahl von Kollisionen während der 1001 Szenarien

	Konstantbremsung	Risikoadaptive Eingriffsstrategie mit degressiver Bremsung
Anzahl Kollisionen	573	384

Abbildung 6.15 stellt für die aufgetretenen Kollisionen die verbleibenden Relativgeschwindigkeiten bei den unterschiedlichen Bremsprofilen einander gegenüber. Es zeigt sich, dass sowohl Minima als auch Maxima (einschließlich der Ausreißer) sowie der Median bei beiden Varianten auf demselben Niveau liegen. Lediglich der Interquartilbereich unterscheidet sich leicht. Vereinfachend wird jedoch davon ausgegangen, dass das Schadensausmaß einer Folgekollision bei Verwendung einer degressiven Bremsung im Vergleich zu einer Konstantbremsung konstant bleibt. Das bedeutet, dass mit der in dieser Arbeit vorgestellten Strategie eine **Reduktion des Folgekollisionsrisikos von 33%** erreicht wird.

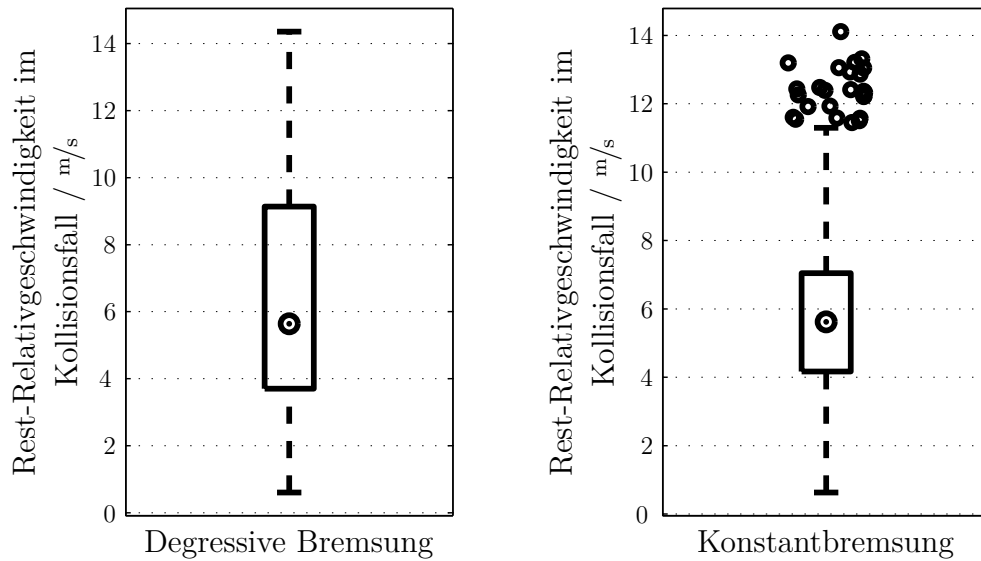


Abbildung 6.15: Verbleibende relative Aufprallgeschwindigkeiten im Kollisionsfall bei den unterschiedlichen Bremsprofilen

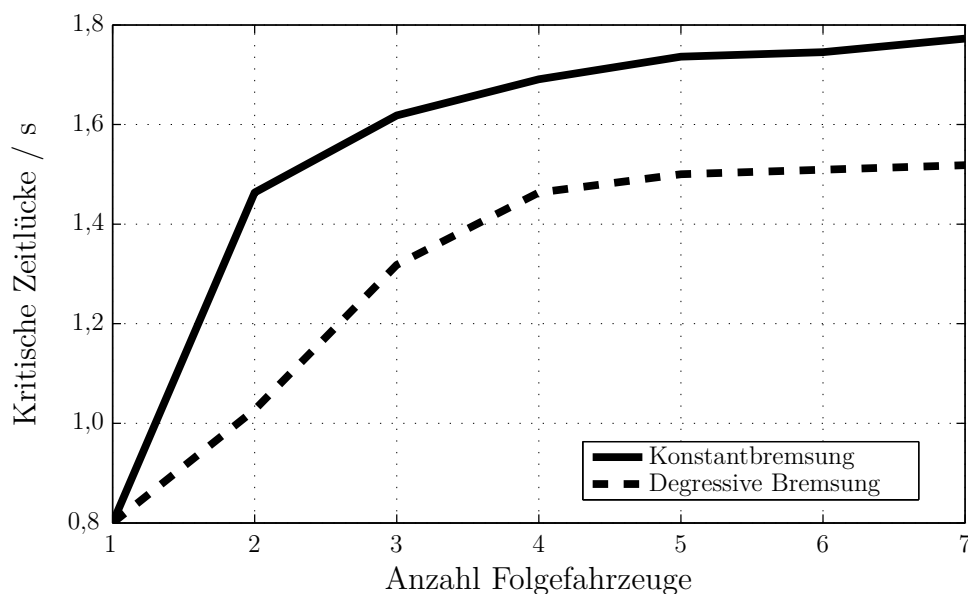


Abbildung 6.16: Kritische Zeitlücke zur Kollisionsvermeidung in Abhängigkeit der Anzahl der Folgefahrzeuge

Bei der Analyse der simulierten Szenarien wird deutlich, dass in Abhängigkeit der Parameter Differenzgeschwindigkeit und Anzahl der Folgefahrzeuge jeweils eine kritische Ausgangszeitlücke existiert, unterhalb derer es immer zur Kollision kommt. Die Abhängigkeit dieser von der Geschwindigkeit ist jedoch nur marginal, was auf das in PELOPS verwendete Fahrermodell zurückzuführen ist, das sein Bremsverhalten an die Ausgangsgeschwindigkeit anpasst. Deutlich abhängig ist die kritische Zeitlücke aber von der Anzahl der Folgefahrzeuge

ge. Abbildung 6.16 stellt die beiden Parameter einander gegenüber. Die kritische Zeitlücke ist darin über die untersuchten Differenzgeschwindigkeiten gemittelt dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die beiden Kurven einem Maximalwert asymptotisch annähern, der bei der degressiven Bremsung deutlich niedriger liegt. Im Folgeverkehr ist damit eine um circa 0,3s kleinere Zeitlücke ausreichend, um nichtsdestotrotz Kollisionsvermeidung mit zwei oder mehreren Folgefahrzeugen zu erreichen.

6.5 Zusammenfassung und Diskussion

Die in dieser Arbeit vorgestellte Eingriffsstrategie ist in der Lage, die Risiken, die mit einer vorverlagerten und verstärkten Bremsung einhergehen, weitreichend zu senken:

In einem Expertentest konnte das Risiko von Falschwarnungen, das vorrangig aus einer geringen Verzeihlichkeit wirksamer Warnelemente resultiert, durch den Einsatz von skalierbaren Rückschaltvorgängen als Auffahrwarnung um mehr als 50% gesenkt werden. Auch wenn die Validität der Expertenurteile durch einen Vergleich mit analogen Probandenuntersuchungen nachgewiesen werden konnte, muss die Wirksamkeit des Schaltrucks noch durch unvoreingenommene Versuchspersonen im Erstkontakt verifiziert werden. Nichtsdestotrotz stellt diese neuartige Vorwarnung eine Möglichkeit zur Verfügung, das bestehende Warndilemma zu durchbrechen.

Bei der Auswertung des Falschauslöserisikos zeigt sich die größte Veränderung mit der risikoadaptiven Eingriffsstrategie: Die zugrundeliegenden Fahrdaten ergeben eine Reduktion von 90% im Vergleich zu einem herkömmlichen Kollisionsvermeidungssystem. Aus Absicherungsgründen müssen die untersuchte Fahrleistung sowie die Zahl der Versuchsfahrer noch erhöht werden. In jedem Fall sind die exakte Analyse der Verkehrssituation sowie des messbaren und modellierten Fahrerverhaltens die Grundlage, das Falschauslöserisiko zu minimieren. Dass dabei der Verzicht auf die Wirksamkeit der Bremsung im Nutzenfall gering ist, konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Ein Kompromiss aus Minimierung des Falschauslöse- und des Auffahrrisikos war in der zugrundeliegenden Untersuchung auf 11% der Fälle beschränkt.

Völlig neuartig ist die Adressierung des Folgekollisionsrisikos durch ein adaptiertes, degressives Bremsprofil. Auch wenn die untersuchte Stichprobe als Folgeverkehr nicht repräsentativ ist, zeigt sie eine signifikant verbesserte Bremsreaktion bei einer degressiven Verzögerung des Vorderfahrzeugs. Dies ist auch bei einer vergrößerten Stichprobe zu erwarten. Die schnellere und adäquate Reaktion spiegelt sich im gemessenen Folgekollisionsrisiko wider: Bei konstantem Schadensausmaß kann durch eine Verringerung der Eintrittshäufigkeit einer Folgekollision im Vergleich zu einer konstanten Bremsung das Folgekollisionsrisiko um mehr als 30% reduziert werden.

Während die Reduktionen des Falschwarn- und -auslöserisikos komplementär wirken, bleibt die Betrachtung des Folgeverkehrs auf die Situationen beschränkt, in denen keine Ausweichmöglichkeit vorhanden ist (vgl. Abschnitt 4.3). Damit wird eine implizite Priorisierung vorgenommen: Das Falschauslöserisiko wird nicht durch eine Vorverlagerung des Bremszeitpunkts – wie beim Folgekollisionsrisiko angedacht – wieder verschlechtert. Al-

ternativ ließe sich das degressive Bremsprofil auch zu einem späteren Zeitpunkt initiieren, was jedoch negative Auswirkungen auf das Kollisionsfolgenminderungspotential und damit auf das Auffahrerisiko hätte. Falschauslöse- und Auffahrerisiko sind demnach in der vorliegenden Arbeit höher priorisiert als das Folgekollisionsrisiko. Dies führt dazu, dass die gesamte, durch die neue Eingriffsstrategie erreichte Risikoreduktion nicht durch einen einzelnen Prozentwert ausgedrückt werden kann, da dieser abhängig von der Häufigkeit der unterschiedlichen Fahrsituationen ist (beispielsweise Ausweichmöglichkeit oder keine Ausweichmöglichkeit). Gleichwohl sind alle Komponenten der Strategie auch als Einzelelemente in einem Gefahrenbremssystem verwendbar.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme spielen die Gefahrenbremssysteme eine wesentliche Rolle. Sie sind in der Lage, eine Auffahrkollision zu verhindern oder zumindest ihre Auswirkungen zu reduzieren. Dies spiegelt sich auch in den Entwicklungstätigkeiten der Automobilhersteller wider. Aufbauend auf einem Abstandsregeltempomaten wurden im Laufe der vergangenen Jahre die Systemgrenzen schrittweise in Richtung vollständiger Kollisionsvermeidung erweitert. Der volkswirtschaftliche Nutzen einer immer früheren und stärkeren Bremsung wird dabei im Rahmen des Förderprojekts AKTIV mit über drei Mrd. Euro¹³ beziffert (vgl. [19]).

Mit der vorverlagerten und verstärkten Bremsung geht jedoch eine Reihe von Risiken einher, deren Reduktion das Ziel der vorliegenden Arbeit ist. Dies sind das Falschwarn- und -auslöserisiko, die aufgrund der schwierigen Situationsbeurteilung bei hohen Differenzgeschwindigkeiten in ungerechtfertigt ausgegebenen Warnungen oder sogar Bremsungen resultieren können. Des Weiteren wird erstmalig auch das Risiko von möglichen Folgekollisionen adressiert, die aufgrund der Bremsung des eigenen Fahrzeugs entstehen können.

Kapitel 2 zeigt die bestehenden Ansätze zur Risikoreduktion sowohl im Forschungsbereich als auch im Serieneinsatz auf und dient der Ableitung der risikoadaptiven Eingriffsstrategie. Auf Seiten des Falschauslöserisikos werden vorrangig Umgebungs- oder Fahrerhaltens-Beobachtungen angestellt, um den Eingriffszeitpunkt an den jeweiligen Fahrerwunsch anzupassen. Großes Potential, das Falschauslöserisiko im Rahmen dieser Arbeit weiter zu senken, hat die Kombination der physikalischen und menschlichen Kenngrößen in einer Auslösestrategie. Auf Seiten der bestehenden Warnkonzepte ist der Zusammenhang ersichtlich, dass mit zunehmender Wirksamkeit eine sinkende Verzeihlichkeit im Falle einer Falschwarnung einhergeht. Dieser Trend ist durch ein neuartiges Warnkonzept aufzuheben, das implizit auf den Fahrerwunsch eingeht. Auf Seiten des Folgekollisionsrisikos wird die Notwendigkeit einer Warnung vor einer möglichen Folgekollision diskutiert.

¹³Zugrunde gelegt werden relevante Auffahrunfälle aus dem Jahr 2004, die durch das verwendete Gefahrenbremssystem vollständig vermieden werden können (Kostensätze siehe [35]).

sionsrisikos sind Ansätze bekannt, den Folgefahrer auf die drohende Gefahrenbremsung beispielsweise durch eine vorgelagerte Teilbremsung vorzubereiten. Wie jedoch aus Sicht des Folgeverkehrs ein Bremsverlauf optimal im Sinne der Kollisionsvermeidung gestaltet werden muss, ist bisher nicht untersucht und wird im Rahmen dieser Arbeit analysiert. Den Lösungsansätzen gemein ist dabei, dass eine eingehende Berücksichtigung des menschlichen Verhaltens sowie die gleichzeitige Analyse der Verkehrssituation die Grundlage für eine weitreichende Senkung der vorgestellten Risiken darstellen.

Die notwendigen Kenngrößen werden in Kapitel 3 erarbeitet. Ausgangsbasis sind dabei die aus vorangegangenen Arbeiten bekannte TTC sowie die Auswahl der relevanten Objekte einschließlich des potentiellen Kollisionsobjekts. Für letzteres werden die letztmöglichen Abstände für ein kollisionsvermeidendes Brems- und Ausweichmanöver berechnet. Für die Nachbarspurobjekte und ein potentiell vorhandenes Folgefahrzeug werden jeweils Kenngrößen eingeführt, die direkt proportional mit den notwendigen Verzögerungen skalieren, die die Verkehrsteilnehmer im Falle eines Spurwechsels beziehungsweise einer Vollbremsung des Egofahrzeugs aufbringen müssen. Damit lassen sich die Spurwechselmöglichkeit sowie die Gefahr von Folgekollisionen bewerten.

Neben der physikalischen Situationsbeurteilung ist auch die Betrachtung des Fahrers notwendig. Da jedoch über die vorhandene Sensorik nur dessen tatsächliche Reaktion messbar ist, müssen für die vorausgehenden Reaktionsauslöser und Reaktionszeiten Modelle geschaffen werden. Ein Reaktionsbedarf wird dazu mit dem Unterschreiten des zeitlichen oder abstandsbierten unteren Folgeabstands gleichgesetzt. Die Reaktionszeit lässt sich unter Annahme einer Gammaverteilung, deren Parameter aus vorhandenen Studien ermittelt werden, für einen einstellbaren Anteil aller Fahrer abschätzen. Und als drittes Glied in der Kette Auslöser-Reaktionszeit-Reaktion muss letztere nicht nur erfasst, sondern auch bewertet werden. Dazu wird überprüft, ob eine Ausweichreaktion durchführbar beziehungsweise eine Bremsreaktion ausreichend ist.

Auf Basis der abgeleiteten Ansätze sowie Kenngrößen stellt Kapitel 4 die risikoadaptive Eingriffsstrategie vor. Während das Falschwarnrisiko immer adressiert wird, findet beim Falschauslöse- und Folgekollisionsrisiko die Unterscheidung statt, ob eine Ausweichmöglichkeit vorliegt oder nicht. Im ersten Fall wird auf eine Berücksichtigung des Folgeverkehrs verzichtet und damit das Auffahr- und Falschauslöserisiko implizit höher priorisiert. Steht jedoch kein Platz zum Überholen zur Verfügung und ist ein Folgefahrzeug vorhanden, findet auch das Folgekollisionsrisiko Berücksichtigung. In diesem Fall besteht keine Gefahr von subjektiven Falschauslösungen.

In einem neuartigen Ansatz zur Reduktion des Falschwarnrisikos werden verstärkte Rückschaltvorgänge als Auffahrwarnung verwendet. Hier liegt die Hypothese zugrunde, dass Fahrer im Falle von Unaufmerksamkeit die Rückschaltung als haptischen Ruck wahrnehmen und damit ihre Aufmerksamkeit wieder auf die Straße richten. Situationsbewusste Fahrer, die während eines Überholvorgangs nah auf das vorausfahrende Fahrzeug auffahren, empfinden sie hingegen als Unterstützung, die ihnen zum Überholen im niedrigeren Gang mehr Drehmoment zur Verfügung stellt. Durch die Transformation der potentiellen Falschwarnung in eine Unterstützungshandlung lässt sich das Warndilemma auflösen. Dies bestätigt auch ein Expertentest, der im Rahmen der Evaluation in Kapitel 6 durchgeführt

wird. Bei gleichbleibender Wirksamkeit im Vergleich zu bestehenden akustischen Warntönen oder einem Bremsruck lässt sich die Verzeihlichkeit um mehr als 50% erhöhen. Gemäß Definition sinkt das Falschwarnrisiko damit um genau diesen Prozentsatz.

Die Hypothese zur Reduktion des Falschauslöserisikos lautet, dass der Fahrer im Normalfall auf reaktionsauslösende Ereignisse reagiert und kritische Situationen selbständig entschärft. Um dies zu überprüfen, wird bis zum Ende der angenommenen Reaktionszeit abgewartet, bis ein aktiver Bremsengriff erfolgt. Ist während dieser Zeit eine Fahreraktion messbar, wird der Eingriff an den Point of no Return verschoben. Mit dieser Herangehensweise kann die Eintrittshäufigkeit von Falschauslösungen und damit das Falschauslöserisiko auf Basis der aufgenommenen Messdaten um 90% reduziert werden. Auswirkungen gibt es jedoch in einigen Fällen ($1/9$ der relevanten Szenarien während der zugrundeliegenden Messfahrt) auf das Kollisionsvermeidungspotential des Systems. Erfolgt keine Reaktion und wird bis nach dem letztmöglichen Bremszeitpunkt gewartet, ist keine vollständige Kollisionsvermeidung mehr möglich.

Im Unterschied zu bestehenden Seriensystemen, die ihre Verzögerung schrittweise aufbauen, wird in der vorliegenden Arbeit zur Reduzierung des Folgekollisionsrisikos der umgekehrte Ansatz gewählt. Ein degressives Bremsprofil, das zunächst maximal und anschließend schwächer verzögert, soll gemäß Hypothese beim Folgefahrer eine schnellere Reaktion abrufen. Dies wird im Rahmen einer Fahrstudie signifikant im Vergleich zu einer konstanten oder ansteigenden Bremsung bestätigt. Bei der Analyse einer Vielzahl von möglichen Folgeverkehrskonstellationen, die unterschiedliche Ausgangsparameter von Geschwindigkeiten, Abständen und Anzahl von Fahrzeugen abdeckt, führt dies dazu, dass die Eintrittshäufigkeit einer Folgekollision bei gleichbleibendem Schadensausmaß – und damit das Folgekollisionsrisiko – um 33% gesenkt werden kann.

Zusammenfassend stellt die vorgestellte Strategie sowohl Einzelbausteine als auch ein integriertes Gesamtsystem zur Verfügung, um die mit der erhöhten Wirksamkeit einer Bremsung zunehmenden Risiken nachhaltig zu reduzieren, ohne negative Auswirkungen auf das Potential eines Kollisionsvermeidungssystems nach sich zu ziehen.

Weiterführende Untersuchungen

Über ein reines Bremssystem hinaus sind Entwicklungstrends in Richtung einer kombinierten Brems- und Ausweichassistenz vorhanden. Für die Art der Ausweichunterstützung existieren dabei verschieden starke Ausprägungen, die in einer ersten Expertenbefragung (Entwicklungserfahrung mit querdynamischen Assistenzsystemen vorausgesetzt; Stichprobe $N = 7$) priorisiert wurden¹⁴:

- Ein gerichteter haptischer Lenkimpuls macht den Fahrer auf die drohende Auffahrsituation aufmerksam und gibt gleichzeitig eine Richtungsinformation vor.
- Ein kontinuierlich ansteigendes Lenkmoment „drängt“ den Fahrer vom potentiellen Kollisionsobjekt ab.
- Eine fahrerinitiierte Unterstützung führt den Fahrer um das Hindernis herum, sobald die Ausweichaktion durch den Fahrer begonnen wird.

¹⁴Inhalte dieses Abschnitts entstanden teilweise im Rahmen der betreuten Abschlussarbeit von Pletschen.

- Ein autonomes Ausweichmanöver löst die Situation ohne den Fahrer selbständig auf.

Abbildung 7.1 stellt die durch die Experten getroffene Rangordnung dar, wobei Platz eins die am stärksten favorisierte Variante bezeichnet. Es zeigt sich, dass sowohl das kontinuierlich ansteigende Moment als auch das autonome Ausweichmanöver am schlechtesten abschneiden. Im ersten Fall stehen vor allem Beherrschbarkeitsbedenken im Vordergrund; das autonome Ausweichen wird hingegen nicht als Unterstützung im originären Sinne, sondern als Überstimmung betrachtet.

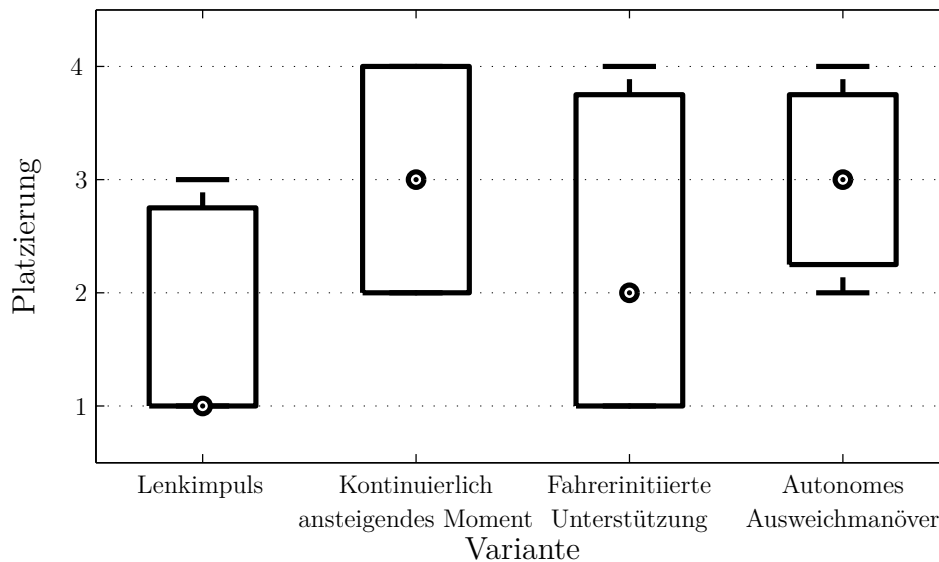


Abbildung 7.1: Priorisierung der Ausweichvarianten

Hohes Potential scheint die Kombination der beiden verbleibenden Varianten Lenkimpuls und fahrerinitiierte Unterstützung zu haben, die auch explizit von den meisten Befragten genannt wird. Diese kann durch den Impuls schon frühzeitig eine Information zur Verfügung stellen, die sowohl aufmerksamkeitsregend als auch richtungsweisend ist. Gleichzeitig hat sie keine wesentlichen Auswirkungen auf die Kursrichtung des Fahrzeugs. Wird jedoch der Ausweichwunsch durch den Fahrer signalisiert, kann durch eine Momentenführung ein kollisionsvermeidendes Ausweichen unterstützt werden.

Ausblick

Die Weiterentwicklung eines Gefahrenbremsystems hin zu einem Brems-/ Ausweichassistenten ist nicht als Ersatz für die vorgestellte Strategie, sondern vielmehr als komplementäre Ergänzung zu sehen. Sie ist in der Lage, aktuell notwendige Kompromisse aufzulösen und die identifizierten Risiken weiter zu senken.

Während die Bereitstellung einer aktiven Ausweichfunktion auch bei hohen Geschwindigkeiten jedoch noch weitreichende Entwicklungshürden bewältigen muss, kann mit der vorgestellten Strategie bereits heute ein hohes Unfallvermeidungspotential bei geringen Risiken erreicht werden. Notwendig wird dazu die vollständige sensorische Ausstattung der Serienfahrzeuge, um sicher den Seiten- und Heckbereich überwachen und beurteilen zu können. Eine sinnvolle Erweiterung der vorgestellten Ansätze stellt dabei die Berücksichtigung von schwankenden Erfassungsgüten der Sensordaten in der Auslösestrategie dar.

Im Folgenden wird eine Übersicht über im Rahmen der Arbeit häufig verwendete Begriffe einschließlich ihrer Definitionen gegeben. Weiterführende Angaben dazu finden sich in der entsprechenden Literatur.

Auffahrrisiko

Produkt aus Eintrittshäufigkeit einer Auffahrkollision pro gefahrene Strecke und verbleibender Relativgeschwindigkeit im Kollisionsfall

Bremsprofil

Verlauf der Verzögerung während einer Bremsung

Eingriffsdilemma

Gefahr von Falschauslösungen bei hohen Differenzgeschwindigkeiten wegen unklarer Fahrerintention (vgl. [66, 85])

Falschauslösung

Als subjektiv falsch empfundene Bremsauslösung bei hohen Differenzgeschwindigkeiten wegen Überhol-/ Ausweichintention (vgl. [67, 85])

Falschauslöserisiko

Produkt aus Eintrittshäufigkeit einer Falschauslösung pro gefahrene Strecke und dem angenommenen konstanten Schadensausmaß „Abschaltung des Systems“

Falschwarnung

Als subjektiv falsch empfundene Warnung bei hohen Differenzgeschwindigkeiten wegen Überhol-/ Ausweichintention (analog Falschauslösung)

Falschwarnrisiko

Produkt aus angenommener konstanter Eintrittshäufigkeit einer Falschwarnung pro gefahrene Strecke und dem zur Verzeihlichkeit inversen Schadensausmaß

Folgekollision

Auffahrkollision zwischen Egofahrzeug und Folgeverkehr aufgrund einer Gefahrenbremsung (vgl. [62, 67])

Folgekollisionsrisiko

Produkt aus Eintrittshäufigkeit einer Folgekollision in den untersuchten Szenarien und verbleibender Relativgeschwindigkeit im Kollisionsfall

Geringer/ niedriger Differenzgeschwindigkeitsbereich

Differenzgeschwindigkeiten unterhalb des Umkehrpunkts von notwendigem Brems- und Ausweichabstand

Handlungsmöglichkeit (auch Handlungsoption, -alternative)

Wahlmöglichkeit zwischen Ausweichen/ Überholen und Bremsen

Hoher/ höherer Differenzgeschwindigkeitsbereich

Differenzgeschwindigkeiten oberhalb des Umkehrpunkts von notwendigem Brems- und Ausweichabstand

Informationsgehalt einer Warnung

Subjektive Einstufung, wie viel Information mit einer Warnung übertragen wird (vgl. [39])

Intention

Entscheidung für Ausweichen/ Überholen oder Bremsen

Kollisionsfolgenminderung

Reduktion der Relativgeschwindigkeit im Falle einer Auffahrkollision (vgl. [28])

Kollisionsfolgenminderungssystem

Bremseingriff zur Kollisionsfolgenminderung meist bei Erreichen der Unvermeidbarkeitsgrenze einer Auffahrkollision

Kollisionsgefahr beim Ausweichen/ Überholen (auch Spurwechsel-, Ausweichmöglichkeit)

Bewertung der Gefährdung des Fahrers im Falle eines Spurwechsels/ Ausweichmanövers (dazu verwendete Kenngrößen sehr heterogen, siehe [4, 64, 66])

Kollisionsgefahr für Egofahrzeug

Bewertung der Gefährdung des Fahrers durch ein langsameres Fahrzeug in seinem Fahrschlauch (vgl. [66])

Kollisionsgefahr für Folgefahrzeug (auch Folgeverkehrskritikalität)

Bewertung der Gefährdung des Fahrers durch ein Folgefahrzeug im Falle einer Gefahrenbremsung

Kollisionsvermeidung

Vollständige Vermeidung einer drohenden Auffahrkollision (vgl. [28])

Kollisionsvermeidungssystem

Bremseingriff zur Kollisionsvermeidung bei Erreichen des letztmöglichen Bremszeitpunkts

Letztmöglicher Bremszeitpunkt

Erreichen des notwendigen Abstands in Längsrichtung für letztmöglich kollisionsvermeidendes Bremsen (vgl. [63])

Letztmöglicher Ausweichzeitpunkt

Erreichen des notwendigen Abstands in Längsrichtung für letztmöglich kollisionsvermeidendes Ausweichen (vgl. [63])

Maximal erreichter Bremspedalweg

Anteil des maximal möglichen Bremspedalwegs während einer Bremsung

Point of no Return

Erreichen der Unvermeidbarkeitsgrenze einer Kollision (vgl. [28])

Reaktion (auch Interaktion, Aktion)

Messbare Fahrerhandlung an Pedalerie, Lenkrad oder Bedienelementen

Reaktionsbedarf (auch Reaktionsauslöser, Ereignis)

Auslösendes Ereignis im Straßenverkehr, auf das der Fahrer zur Kollisionsvermeidung reagieren muss

Reaktionszeit

Dauer zwischen Auftreten des Reaktionsauslösers und Einsetzen der Reaktion

Reaktionszeitende

Zeitliche Schwelle, zu der die angenommene Reaktionszeit endet

Spurwechselmotivation (auch Überholwunsch)

Muster aus messbaren Einzelwerten, das auf ein baldiges Überholen hinweist (vgl. [54])

Time to Collision (TTC)

Verbleibende Zeit bis zur Kollision in Längsrichtung unter Beibehaltung der momentanen Relativedynamik zwischen Eigen- und Fremdfahrzeug (vgl. [42])

Unvermeidbarkeit einer Kollision

Weder Bremsen noch Ausweichen reicht zur Kollisionsvermeidung aus

Verzeihlichkeit einer Warnung

Subjektive Einstufung der Entschuldbarkeit einer Falschwarnung (erstmalig definiert in [39], u.a. aufgegriffen in [37, 40, 95])

Vorkonditionierung des Folgefahrers

Grad der Vorwarnung des nachfolgenden Verkehrs auf eine drohende Gefahrenbremsung

Warndilemma

Zunehmende Wirksamkeit einer Warnung, je früher sie ausgegeben wird, mit gleichzeitig abnehmender Verzeihlichkeit (vgl. [95])

Wirksamkeit einer Bremsung

Quotient aus abgebauter und vorher vorhandener Relativgeschwindigkeit zwischen Egofahrzeug und Kollisionsobjekt bei einer Gefahrenbremsung

Wirksamkeit einer Warnung

Subjektive Einstufung der kollisionsvermeidenden Wirkung einer Warnung (vgl. [39])

Zeit bis zum maximal erreichten Bremspedalweg

Zeit zwischen dem auslösenden Ereignis und dem Zeitpunkt des maximalen Bremspedalwegs

Zeitlücke

Zeit, nach der sich das folgende Fahrzeug am aktuellen Ort des Egofahrzeugs befindet

Zeitreserve (auch Reaktionszeitreserve)

Verbleibende Zeit, bis der Fahrer zur Kollisionsvermeidung letztmöglich reagieren muss (vgl. [53])

ANHANG B

Fragebögen

B.1 Fragebogen zum Expertentest

Name: _____

Datum: _____

Vorabfragen

Hätten Sie generell gerne ein System in Ihrem Fahrzeug, das Sie vor einer möglichen Auffahrkollision warnt?

☐ ja ☐ nein

Warum?

Falls ja, bringen Sie bitte die unten aufgeführten Varianten in die Reihenfolge Ihrer Priorisierung, wobei ① die am stärksten favorisierte Vorwarnung bezeichnet.

Optik: _____

Akustik: _____

Haptik: _____

Wie schätzen Sie im Vergleich zu anderen Autofahrern Ihre Fahrerfahrung ein?

wenig erfahren ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr erfahren

Wie schätzen Sie im Vergleich zu anderen Autofahrern Ihren Fahrstil ein?

ruhig/ ausgeglichen ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sportlich/ dynamisch

Haben Sie in den vergangenen drei Monaten eine knappe Auffahrsituation oder sogar einen Auffahrunfall erlebt?

☐ ja ☐ nein

Falls ja, bitte beschreiben Sie die Situation.

Variante A/ B/ C/ D

Haben Sie in der Auffahrsituation eine Vorwarnung wahrgenommen?	
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
Falls ja, was haben Sie wahrgenommen?	
Haben Sie die Vorwarnung als hilfreich empfunden?	
gar nicht hilfreich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr hilfreich	

Haben Sie in der Überholsituation eine Vorwarnung wahrgenommen?	
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
Falls ja, was haben Sie wahrgenommen?	
Haben Sie die Vorwarnung als störend empfunden?	
gar nicht störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr störend	

	lehne stark ab	lehne ab	teils, teils	stimme zu	stimme stark zu
Hat die Vorwarnung Ihre Aufmerksamkeit erregt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hat Sie die Vorwarnung auf die Situation hingewiesen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hat Sie die Vorwarnung zur Handlung animiert?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie beurteilen Sie die Intensität der Vorwarnung?	
viel zu stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> viel zu schwach	

Abschlussfragen

Bringen Sie bitte die kennengelernten Varianten in die Reihenfolge Ihrer Priorisierung, wobei ① die am stärksten favorisierte Vorwarnung bezeichnet.

Variante A:
Optik

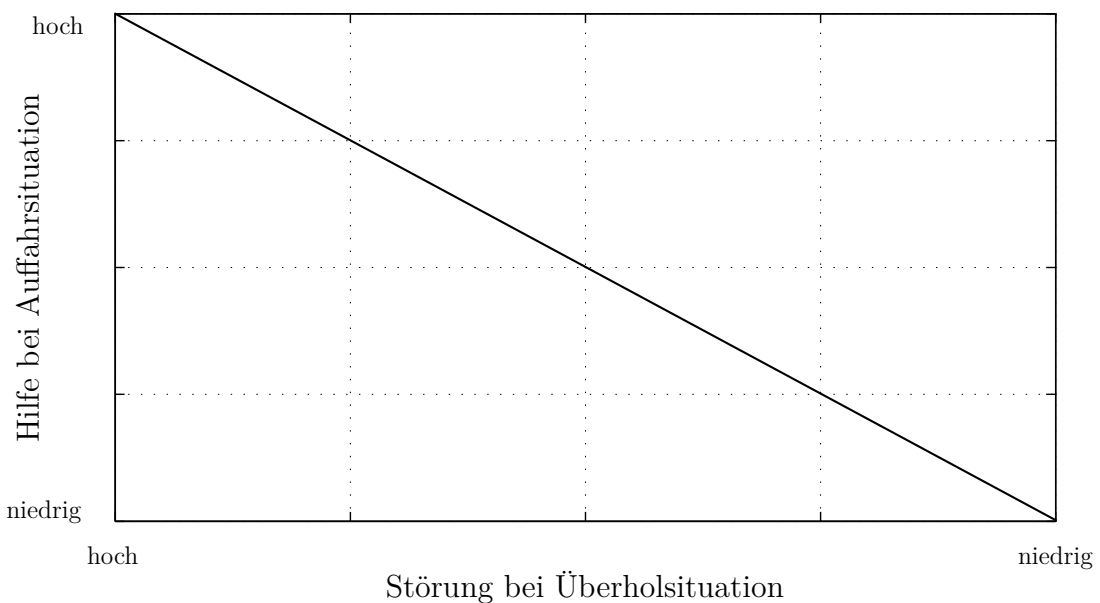
Variante B:
Akustik

Variante C:
Haptik
(Bremsruck)

Variante D:
Haptik
(Schaltruck)

Warum?

Ordnen Sie bitte die kennengelernten Varianten in die Kategorien „Störung bei Überholsituation“ und „Hilfe bei Auffahrsituation“ ein.



Wie sieht für Sie in eigenen Worten die optimale Ausprägung einer Vorwarnung aus?

B.2 Fragebogen zur Fahrsimulatorstudie

VP Nr.: _____ Datum: _____

Variante: _____ Uhrzeit: _____

Demographische Vorabfragen

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer

Vielen Dank für Ihr Interesse an unserer Untersuchung. Wir benötigen einige persönliche Daten von Ihnen und bitten Sie, den folgenden Fragebogen auszufüllen. Diese Daten werden vertraulich behandelt und ausschließlich für die statistische Auswertung verwendet.

Geschlecht	
<input type="checkbox"/> weiblich	<input type="checkbox"/> männlich

Alter	Jahre

Haben Sie eine Farbschwäche?		
<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja (rot/ grün)	<input type="checkbox"/> ja (blau/ gelb)

Welches Auto fahren Sie derzeit (hauptsächlich)?	
Marke/ Modell	
Baujahr	

Wie häufig fahren Sie maximal?				
<input type="checkbox"/> jeden Tag	<input type="checkbox"/> jede Woche	<input type="checkbox"/> jeden Monat	<input type="checkbox"/> seltener	

Wie hoch ist Ihre jährliche Fahrleistung?

☐ < 5.000 km ☐ < 10.000 km ☐ < 20.000 km ☐ > 20.000 km

... davon hauptsächlich

☐ Stadtfahrten ☐ Überlandfahrten ☐ Autobahnfahrten

Wie schätzen Sie Ihren Fahrstil ein?

sehr ruhig/ ausgeglichen ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr sportlich/ dynamisch

Haben Sie schon einmal an einem Fahrversuch in einem Fahrsimulator teilgenommen?

☐ noch nie ☐ ja (1-5 mal) ☐ ja (> 5 mal)

VP Nr.: _____

Variante: _____

Abschlussfragen

Ist Ihnen während der Fahrt etwas Ungewöhnliches aufgefallen?

Es gab während der Fahrt Situationen, in denen vor Ihnen ein Fahrzeug stark gebremst hat. Konnten Sie Unterschiede in den einzelnen Bremsungen identifizieren? Wenn ja, welche?

Bei den einzelnen Bremsungen gab es Unterschiede in den Bremsstärken und Bremsdauern. Können Sie diese beschreiben?

Verspürten Sie während der Simulatorfahrt irgendeine Art von Schwindel, Übelkeit oder Ähnliches?

☐ ja ☐ nein

Falls ja, wie stark?

sehr leicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr stark

Haben Sie in letzter Zeit eine kritische Situation (Ausweichmanöver, Gefahrenbremsung, etc.) im realen Straßenverkehr erlebt?

☐ ja ☐ nein

Falls ja, wann?

Haben Sie während der Versuchsfahrt bemerkt, dass der Versuchsgegenstand Bremsmanöver der Vorderfahrzeuge sind? Wenn ja, ab wann ungefähr (zeitlich, Bremsung Nr.)?

Haben Sie schon einmal an einem Fahrsicherheitstraining teilgenommen?

☐ nein ☐ 1-2 mal ☐ 3-4 mal ☐ > 4 mal

Besitzen Sie einen BMW-internen Führerschein?

☐ ja ☐ nein

Falls ja, welchen/ welche?

Haben Sie Kritik, Anregungen oder Anmerkungen zu der Untersuchung?

Vielen Dank für Ihre Mitwirkung an dieser Studie!

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC: *Vergleichstest von Notbremsassistenten*. Testbericht, 2011
- [2] AEGERHARD, Michael; KAEMPCHEN, Nico: High-Level Sensor Data Fusion Architecture for Vehicle Surround Environment Perception. In: *8th International Workshop on Intelligent Transportation*. Hamburg, März 2011, S. 173–178
- [3] ALLISON, Paul D.: Missing Data. In: MILLSAP, Roger E. (Hrsg.); MAYDEU-OLIVARES, Alberto (Hrsg.): *The SAGE Handbook of Quantitative Methods in Psychology*. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2009, S. 72–89
- [4] AMELING, Christian: *Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem*, Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation, 2002
- [5] ARDELT, Michael: *Hybrid Control Strategies for Advanced Safety- and Driver Assistance Systems*, Technische Universität München, Dissertation, 2012
- [6] BITTRICH, Katrin; BLANKENBERGER, Sven: *Experimentelle Psychologie – Ein Methodenkompendium*. Weinheim: Beltz Verlag, 2011
- [7] BLOCH, Alexander: Anstoß-Punkt. In: *auto motor und sport* (2010), Nr. 24, S. 39–46
- [8] BORTZ, Jürgen: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2005
- [9] BORTZ, Jürgen; DÖRING, Nicola: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2006
- [10] BRAESS, Hans-Hermann (Hrsg.); SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [11] BREUER, Bert (Hrsg.); BILL, Karlheinz H. (Hrsg.): *Bremsenhandbuch*. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2012

- [12] BREUER, Jörg: Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 55–68
- [13] BROWN, Timothy L.; LEE, John D.; MCGEHEE, Daniel V.: Human Performance Models and Rear-End Collision Avoidance Algorithms. In: *Human Factors* 43 (2001), Nr. 3, S. 462–482
- [14] BUBB, Heiner: Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In: LANDAU, Kurt (Hrsg.); WINNER, Hermann (Hrsg.): *Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2003, S. 26–39
- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2000*. 29. Jahrgang. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2000
- [16] BURCKHARDT, Manfred; REIMPELL, Jörn (Hrsg.): *Fahrwerktechnik: Bremsdynamik und Pkw-Bremsanlagen*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel-Buchverlag, 1991
- [17] COELINGH, Erik; EIDEHALL, Andreas; BENGTTSSON, Mattias: Collision Warning with Full Auto Brake and Pedestrian Detection – a practical example of Automatic Emergency Braking. In: *13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*. Madeira, September 2010, S. 155–160
- [18] DAGLI, Ismael; BREUEL, Gabi; SCHITTENHELM, Helmut: Einscherer-Erkennung mit erweiterter Umgebungserfassung – Eine Machbarkeitsstudie. In: *VDI-Fachtagung Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz*. Berlin, November 2003, S. 287–300
- [19] DASCHNER, Dieter; GWEHENBERGER, Johann; SCHWARZ, Stephan; WERMUTH, Gisbert; SCHÖNFELDER, Marcel; HOFMANN, Florian: Unfallstruktur- und Wirkpotenzialanalysen zu den AKTIV-Applikationen auf der Basis von Pkw-Haftpflichtschäden mit Personenschaden / Allianz Zentrum für Technik. 2010. – Forschungsbericht
- [20] DESURVIRE, Heather W.: Faster, Cheaper!! Are Usability Inspection Methods as Effective as Empirical Testing? In: NIELSEN, Jakob (Hrsg.); MACK, Robert L. (Hrsg.): *Usability Inspection Methods*. 1. Auflage. New York: John Wiley & Sons, 1994, Kapitel 7, S. 173–202
- [21] EHMANN, Dirk: *Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen*, RWTH Aachen, Dissertation, 2002
- [22] EURO NCAP: *Auszeichnung 2010 – Honda Collision Mitigation Brake System*. http://www.euroncap.com/de/rewards/honda_collision_mitigation_brake_system.aspx, Abruf: 26.04.2011

-
- [23] FECHER, Norbert: *Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW-Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2005
- [24] FECHER, Norbert; HOFFMANN, Jens; WINNER, Hermann; FUCHS, Klaus; ABENDROTH, Bettina; BRUDER, Ralph: Aktive Gefahrenbremsungen – Wie reagiert das Fahrer-Fahrzeug-System? In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 111 (2009), Nr. 2, S. 140–146
- [25] FILZEK, Björn: *Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2002
- [26] FÖLLINGER, Otto: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 10. Auflage. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2008
- [27] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KRAFTFAHRWESEN: *PELOPS White Paper*. http://www.fka.de/pdf/pelops_whitepaper.pdf, Abruf: 27.04.2012
- [28] FREYMAN, Raymond: Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. In: *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching, März 2004
- [29] GEDULD, Georg: Lidarsensorik. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 172–186
- [30] GEIGER, Walter; KOTTE, Willi: *Handbuch Qualität – Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven*. 5. Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008
- [31] GEORGI, Hans-Otto: *Stochastik – Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik*. 2. Auflage. Berlin: Walter de Gruyter, 2004
- [32] GIES, Stefan: *Vorlesungsumdruck Fahrzeugtechnik III*. 7. Auflage. Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 2008
- [33] GREEN, Marc: “How Long Does It Take to Stop?” – Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. In: *Transportation Human Factors* 2 (2000), Nr. 3, S. 195–216
- [34] HENLE, Lothar; REGENSBURGER, Uwe; DANNER, Bernd; HENTSCHEL, Elisabeth; HÄMMERLING, Carsten: Fahrerassistenzsysteme. In: *ATZ extra – Die neue E-Klasse von Mercedes-Benz* (2009), Januar, S. 56–62
- [35] HÖHNSCHIED, Karl-Josef; STRAUBE, Martina: Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland 2004. Bergisch Gladbach, 2006 (2). – Wissenschaftliche Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen

- [36] HICK, William E.: On the rate of gain of information. In: *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 4 (1952), Nr. 1, S. 11–26
- [37] HIESGEN, Gregor: *Effiziente Entwicklung eines menschenzentrierten Querführungsassistentensystems mit einem Fahrsimulator*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2011
- [38] HILLENBRAND, Jörg: *Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2007
- [39] HOFFMANN, Jens: *Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2008
- [40] HOFFMANN, Jens; GAYKO, Jens: Fahrerwarnelemente. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 343–354
- [41] HONDA: *Kollisionswarnsystem (CMBS)*. http://www.honda.de/content/innovation/sicherheit_technik/sicherheit_kollisionswarnsystem.php, Ab-ruf: 26.04.2011
- [42] HORST, Richard van d.; HOGEMA, Jeroen: Time-to-Collision and Collision Avoidance Systems. In: *Proceedings of the 6th ICTCT Workshop: Safety Evaluation of Traffic Systems: Traffic Conflicts and Other Measures*. Salzburg, Oktober 1993, S. 109–121
- [43] ISERMANN, Rolf; MANNALE, Roman; SCHMITT, Ken: Collision avoidance systems PRORETA: situation analysis and intervention control. In: *6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control*. München, Juli 2010, S. 461–470
- [44] ISO/DIS 26262-3: *Road vehicles – Functional safety – Part 3: Concept phase*. Vorläufige Norm, Juni 2009
- [45] JANSSON, Jonas; JOHANSSON, Jonas; GUSTAFSSON, Fredrik: Decision Making for Collision Avoidance Systems. In: *Journal of Passenger Cars: Electronic and Electrical Systems* 111 (2002), S. 197–204
- [46] KALINOWSKA, Dominika; KUNERT, Uwe: Kraftfahrzeugverkehr 2008 noch auf ho-hem Niveau. In: *Wochenbericht des DIW Berlin* (2009), Nr. 50, S. 872–882
- [47] KARRENBURG, Simon: *Zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen von Kraftfahr-zeugen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2008
- [48] KATES, Ronald: *Modellierung von Reaktionsprozessen im Rahmen der Assistenzfunk-tion “Aktive Gefahrenbremsung” (AKTIV-AGB)*. 2007. – BMW Group Forschung und Technik, München

-
- [49] KLAUER, Sheila G.; DINGUS, Thomas A.; NEALE, Vicki L.; SUDWEEKS, Jeremy; RAMSEY, David: The Impact of Driver Inattention on Near-Crash/Crash Risk: An Analysis Using the 100-Car Naturalistic Driving Study Data / National Highway Traffic Safety Administration. 2006 (DOT HS 810 594). – Forschungsbericht
- [50] KNAPPE, Gwendolin: *Empirische Untersuchungen zur Querregelung in Fahrsimulatoren – Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen und Sensitivität von Messgrößen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2009
- [51] KNAPPE, Gwendolin; KEINATH, Andreas; MEINECKE, Cristina: Empfehlungen für die Bestimmung der Spurhaltegüte im Kontext der Fahrsimulation. In: *MMI-Interaktiv* (2006), Dezember, Nr. 11, S. 3–13
- [52] KOLBE, Uli; MOSER, Martin; OLTMANN, Volker; SCHNECKENBURGER, Reinhold: *Verfahren zur Verhinderung von Kollisionen oder Verminderung einer Kollisionsstärke eines Fahrzeugs*. Offenlegungsschrift, August 2011. – DE 10 2010 008 208 A1
- [53] KOPF, Matthias: *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1993
- [54] KOPF, Matthias: Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen? In: MAURER, Markus (Hrsg.); STILLER, Christoph (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin: Springer-Verlag, 2005, S. 117–139
- [55] KOPISCHKE, Stephan: *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2000
- [56] KRAMER, Ulrich: *Kraftfahrzeugführung*. München: Carl Hanser Verlag, 2008
- [57] KURATORIUM FÜR VERKEHRSSICHERHEIT: *Rechtzeitig blinken: Beim Spurwechsel lassen es die meisten bleiben*. Presse-Information, 15. November 2007
- [58] LAGES, Ulrich S.: *Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen*, Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation, 2001
- [59] LEE, John D.; MCGEHEE, Daniel V.; BROWN, Timothy L.; REYES, Michelle L.: Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator. In: *Human Factors* 44 (2002), Nr. 2, S. 314–334
- [60] LINGS, Svend: Assessing driving capability: A method for individual testing. In: *Applied Ergonomics* 22 (1991), Nr. 2, S. 75–84
- [61] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 1 – Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 7. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2008

- [62] MAURER, Markus: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 43–54
- [63] MAURER, Thomas; KNOOP, Steffen; SCHRAMM, Dieter; KISTNER, Arnold: Barrieren in der Umfelderkennung für autonome Notbrems- und Ausweichsysteme. In: PROFF, Heike (Hrsg.); SCHÖNHARTING, Jörg (Hrsg.); SCHRAMM, Dieter (Hrsg.); ZIEGLER, Jürgen (Hrsg.): *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: Betriebswirtschaftliche und technische Aspekte*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012, S. 175–188
- [64] MILDNER, Frank: *Untersuchungen zur Erkennung und Vermeidung von Unfällen für Kraftfahrzeuge*, Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation, 2004
- [65] MILICIC, Natasa: *Sichere und ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug*, Technische Universität München, Dissertation, 2010
- [66] NITZ, Gregor: *Entwicklung eines Systems zur aktiven Bremsung eines Fahrzeugs in Gefahrensituationen*, Technische Universität München, Dissertation, 2009
- [67] NITZ, Gregor; ZAHN, Peter: Nutzergerechte Eingriffstrategien für ein aktives Gefahrenbremssystem. In: *17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen, Oktober 2008, S. 1593–1608
- [68] PANKALLA, Horst; SALZBERGER, Raluca; HÄNSEL, Eiko; BOTSCH, Michael; BREU, Alexander; HELD, Ralf: Fahrerassistenz und Integrale Sicherheit. In: *ATZ extra – Der neue AUDI A6* (2011), S. 204–207
- [69] RASCH, Björn; FRIESE, Malte; HOFMANN, Wilhelm; NAUMANN, Ewald: *Quantitative Methoden 2 – Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2010
- [70] REIF, Konrad (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- [71] SCHALLER, Thomas; SCHIEHLEN, Joachim; GRADENEGGER, Barbara: Stauassistent – Unterstützung des Fahrers in der Quer- und Längsführung: Systementwicklung und Kundenakzeptanz. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching, April 2008
- [72] SCHNEIDER, Jörg H.: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2009
- [73] SCHNELLBACH, Adam; SCHLOSKE, Alexander; RAUSCHENBACH, Matthias; GOLDBACH, Daniel; WENNMACHER, Harriet: Funktionale Sicherheit. In: WERDICH, Martin (Hrsg.): *FMEA – Einführung und Moderation*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011, S. 134–141

-
- [74] SCHOPPER, Michael; REGENSBURGER, Uwe; SALGUEIRO, Nuno; EISENMANN, Marc: Fahrerassistenzsysteme. In: *ATZ extra – Der neue SLK von Mercedes-Benz* (2011), S. 124–129
- [75] SCHRAMM, Dieter; HILLER, Manfred; BARDINI, Roberto: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Berlin: Springer-Verlag, 2010
- [76] SCHRÖDER, Caterina: *Neue Assistenzsysteme für den 5er BMW*. Version: 26. November 2009. <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/10934/Neue-Assistenzsysteme-fuer-den-5er-BMW.html>, Abruf: 26.04.2011
- [77] SMITH, David L.; GLASSCO, Richard; CHANG, James; COHEN, Daniel: Feasibility of Modeling Lane-Change Performance. In: *Journal of Passenger Cars: Electronic and Electrical Systems* 112 (2003), S. 217–233
- [78] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *2010: Erstmals weniger als 4.000 Tote im Straßenverkehr*. Pressemitteilung Nr. 463, Dezember 2010
- [79] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: Verkehrsunfälle 2010. In: *Verkehr* Fachserie 8, Reihe 7 (2011)
- [80] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *Zahl der Verkehrstoten 2011 um 9,4% gestiegen*. Pressemitteilung Nr. 065, Februar 2012
- [81] STECK, Bernhard: Auswertung mit Beurteilung von Abstandsmessungen im Straßenverkehr mit den Methoden der mathematischen Statistik. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (1991), Nr. 7/8, S. 224–234
- [82] STÄHLIN, Ulrich: *Eingriffsentscheidung für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2008
- [83] STILLER, Christoph: Fahrerassistenzsysteme – Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: MAURER, Markus (Hrsg.); STILLER, Christoph (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin: Springer-Verlag, 2005, S. 1–20
- [84] STILLER, Christoph; BACHMANN, Alexander; DUCHOW, Christian: Maschinelles Sehen. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 198–222
- [85] STÄMPFLE, Martin; BRANZ, Wolfgang: Kollisionsvermeidung im Längsverkehr – die Vision vom unfallfreien Fahren rückt näher. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching, April 2008
- [86] SUGIMOTO, Yoichi; SAUER, Craig: Effectiveness Estimation Method for Advanced Driver Assistance System and its Application to Collision Mitigation Brake System. In: *19th International Conference on Enhanced Safety of Vehicles*. Washington D.C., Juni 2005

- [87] ULLMAN, David G.: *Making Robust Decisions*. 1. Auflage. Victoria: Trafford Publishing, 2006
- [88] UNITED NATIONS: *Convention on Road Traffic*. Wien, November 1968
- [89] VORBERG, Dirk; BLANKENBERGER, Sven: Die Auswahl statistischer Tests und Maße. In: *Psychologische Rundschau* 50 (1999), Nr. 3, S. 157–164
- [90] VORNDRAN, Ingeborg: Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2009. In: *Wirtschaft und Statistik* (2010), Nr. 7, S. 628–641
- [91] WALLENTOWITZ, Henning (Hrsg.); REIF, Konrad (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeug-elektronik*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [92] WEISS, Kristian: *Interpretation von Fahrumgebungen für Fahrerassistenzsysteme*, Universität Rostock, Dissertation, 2007
- [93] WEISEN, Ralf: *Gekoppelte Quer- und Längsregelung eines Personenkraftwagens im fahrphysikalischen Grenzbereich*, Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation, 2003
- [94] WIEDEMANN, Rainer: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, Universität Karlsruhe, Habilitation, 1974
- [95] WINNER, Hermann: Frontalkollisionsschutzsysteme. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 522–542
- [96] WINNER, Hermann: Radarsensorik. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 123–171
- [97] WINNER, Hermann; DANNER, Bernd; STEINLE, Joachim: Adaptive Cruise Control. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009, S. 478–521
- [98] ZÖLLER, Henrik; HUGEMANN, Wolfgang: Zur Problematik der Bremsreaktionszeit im Straßenverkehr. In: *37. BDP-Kongreß für Verkehrspsychologie*. Braunschweig, September 1998
- [99] ZOMOTOR, Adam; REIMPELL, Jörn (Hrsg.): *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel-Buchverlag, 1987

Eigene Veröffentlichungen und Patentanmeldungen

- [100] RASSHOFER, Ralph; KLANNER, Felix; REINISCH, Philipp; SCHWARZ, Daniel: Kooperative Sensorik und kooperative Perzeption – Auf dem Weg zum holistischen Verkehr. In: *15. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2011 (VDI-Berichte 2132), S. 651–665
- [101] REINISCH, Philipp; FITZEK, Frerk: Anwendungsbezogener Sensorsystemvergleich für ein Gefahrenbremssystem. In: PROFF, Heike (Hrsg.); SCHÖNHARTING, Jörg (Hrsg.); SCHRAMM, Dieter (Hrsg.); ZIEGLER, Jürgen (Hrsg.): *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: Betriebswirtschaftliche und technische Aspekte*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012, S. 189–199
- [102] REINISCH, Philipp; KOHLHUBER, Florian; ZAHN, Peter: Nutzung von Schaltvorgängen zur situationsoptimalen Vorwarnung für ein Gefahrenbremssystem. In: *26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2010 (VDI-Berichte 2104), S. 279–288
- [103] REINISCH, Philipp; KOHLHUBER, Florian; ZAHN, Peter: Schaltvorgänge zur situationsangepassten Vorwarnung des Fahrers. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr. 3, S. 210–214
- [104] REINISCH, Philipp; ZAHN, Peter: *Notbremsassistent zum automatischen Abbremsen eines Fahrzeugs zur Kollisionsvermeidung oder Kollisionsfolgenminderung*. Offenlegungsschrift, August 2011. – DE 10 2010 006 214 A1, WO 2011/092216 A1
- [105] REINISCH, Philipp; ZAHN, Peter: *Verfahren zum automatischen Abbremsen eines Fahrzeugs zur Kollisionsvermeidung oder Kollisionsfolgenminderung*. Offenlegungsschrift, August 2011. – DE 10 2010 006 762 A1, WO 2011/095510 A1
- [106] REINISCH, Philipp; ZAHN, Peter: *Verfahren zum automatischen Abbremsen eines Fahrzeugs zur Kollisionsvermeidung oder Kollisionsfolgenminderung*. Offenlegungsschrift, August 2011. – DE 10 2010 006 215 A1, WO 2011/092229 A1
- [107] REINISCH, Philipp; ZAHN, Peter; SCHRAMM, Dieter: Using a Reaction Time Model for Determining a Collision Avoidance System’s Brake Timing. In: *6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control*. München, Juli 2010, S. 477–482
- [108] WERLING, Moritz; REINISCH, Philipp; SCHRAMM, Dieter: Vernetzungstechnologien als Beitrag zur integrierten Kollisionsvermeidung. In: *5. Tagung Fahrerassistenz: Schwerpunkt Vernetzung*. München, Mai 2012
- [109] ZAHN, Peter; REINISCH, Philipp; NITZ, Gregor: *Verfahren zum automatischen Abbremsen eines Fahrzeugs zur Kollisionsvermeidung oder Kollisionsfolgenminderung*. Offenlegungsschrift, August 2011. – DE 10 2010 007 252 A1, WO 2011/098431 A1

Betreute studentische Arbeiten

FACIUS, Thorsten: *Analyse des Fahrerverhaltens in Abhängigkeit des Verzögerungsverlaufs des Vorderfahrzeugs*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, Juli 2011

JANTSCHIK, Martin: *Auswertung von Funkdaten für hochdynamische Fahrerassistenzsysteme am Beispiel der aktiven Gefahrenbremsung*, Hochschule Ulm, Bachelorarbeit, Juni 2010

KOHLHUBER, Florian: *Nutzung von Schaltvorgängen zur situationsoptimalen Vorwarnung für ein Gefahrenbremssystem*, Technische Universität München, Diplomarbeit, Juni 2010

PLETSCHEN, Nils: *Entwicklung und Evaluation eines Querführungssystems in Gefahrensituationen*, Technische Universität München, Diplomarbeit, März 2011